



TITLE:

# 地盤リスクによるプロジェクト事業性の不確実性評価に関する研究(Dissertation\_全文)

AUTHOR(S):

尾ノ井, 芳樹

---

CITATION:

尾ノ井, 芳樹. 地盤リスクによるプロジェクト事業性の不確実性評価に関する研究. 京都大学, 2006, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2006-01-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r11776>

RIGHT:

# 地盤リスクによるプロジェクト事業性 の不確実性評価に関する研究

2006 年 1 月

尾ノ井芳樹

# 目 次

第1章 序 論 .....	1
1.1 研究の背景 .....	1
1.2 民活インフラプロジェクトの国際的動向 .....	4
1.3 民間事業における建設工事リスク評価 .....	9
1.4 市場リスクと金融工学 .....	10
1.5 本研究の目的と対象 .....	12
1.6 本論文の展開と構成 .....	12
第2章 インフラ事業におけるプロジェクトリスクに関する研究 .....	18
2.1 緒言 .....	18
2.2 建設工事リスクに関する既往研究 .....	20
2.3 民間事業リスクに関する既往研究 .....	21
2.3.1 変動金利に関するモデル .....	22
2.3.2 プロジェクトリスクの確率的取扱い .....	24
2.3.3 事業資産評価 .....	25
2.4 結語 .....	25
第3章 地盤リスクの確率評価手法に関する研究 .....	28
3.1 緒言 .....	28
3.2 地盤リスクの概念 .....	28
3.3 確率論を用いた地質条件の推定とモデル化 .....	32
3.3.1 導入 .....	32
3.3.2 クリギングによるモデル .....	32
3.3.3 クリギングによる幾何学的地盤リスクの評価方法 .....	33
3.3.4 インディケータクリギングによる力学的地盤リスクの評価方法 .....	39
3.4 力学的要因に起因する建設コスト変動リスクの評価方法 .....	42
3.4.1 力学的パラメータ .....	42
3.4.2 地下工事のコスト変動特性 .....	43

3.4.3	インディケータークリギングによる RMR 推定と建設コスト .....	45
3.5	地下構造物を対象とした力学的要因による建設コスト変動リスクの 評価結果.....	49
3.5.1	解析プロセス .....	49
3.5.2	トンネルの推定コスト変動リスク .....	50
3.5.3	地下発電所空洞の推定コスト変動リスク .....	59
3.5.4	放水路トンネル・地下発電所空洞合成ボラティリティ .....	66
3.6	結語 .....	67
<b>第 4 章</b>	<b>事業リスク評価手法に関する研究 .....</b>	<b>70</b>
4.1	緒言 .....	70
4.2	金融資産リスクと事業資産リスク .....	71
4.2.1	資産の概念 .....	71
4.2.2	資産の種類によるリスク計量の実態.....	71
4.2.3	金融資産リスク .....	72
4.2.4	事業資産リスク .....	74
4.2.5	事業資産リスク計量評価の必要性 .....	78
4.3	BOT 事業のリスクミティゲーションと投融資評価手法 .....	80
4.3.1	事業評価の指標 .....	80
4.3.2	計量管理困難リスクの事業スキームによる排除 .....	82
4.3.3	事業投資の基準 .....	86
4.3.4	融資の基準 .....	88
4.3.5	評価期間の設定 .....	90
4.4	キャッシュフローの不確実性.....	92
4.4.1	キャッシュフローの確実性とローン.....	92
4.4.2	ダイナミックキャッシュフローによる投融資評価 .....	94
4.4.3	建設工事起因のリスク分担.....	96
4.5	結語.....	99
<b>第 5 章</b>	<b>地盤リスクの PFI プロジェクト事業性への影響に関する実証的研究.....</b>	<b>102</b>
5.1	緒言.....	102
5.2	ケースプロジェクトの概要 .....	103

5.2.1	発電所全体構造の概要.....	103
5.2.2	ケースプロジェクトの開発・運営スキーム.....	106
5.3	キャッシュフローモデル.....	112
5.3.1	事業評価の前提条件.....	112
5.3.2	基本ケースの事業性.....	114
5.4	工事費ボラティリティの SPC 財務への影響.....	115
5.4.1	検討する工事費リスクの範囲.....	115
5.4.2	ケースプロジェクトの工事費.....	115
5.4.3	工事費ボラティリティとフィナンシャルモデルの結合.....	116
5.4.4	土木工事の変動リスクのレベル.....	119
5.4.5	地質条件要因によるコスト変動確率分布.....	120
5.4.6	ダイナミックキャッシュフローモデル.....	120
5.5	解析結果と考察.....	121
5.5.1	解析結果.....	121
5.5.2	考察.....	121
5.6	結語.....	126

## 第6章 建設リスクおよび市場性リスクを有するプロジェクトの

	総合事業評価に関する研究.....	129
6.1	緒言.....	129
6.2	事業評価において財務的影響のあるリスクファクター.....	131
6.2.1	分析対象とするリスクの構成.....	131
6.2.2	分析モデルの前提条件.....	133
6.2.3	地盤起因工事費リスクの扱い.....	133
6.2.4	変動金利の検討.....	133
6.3	各種リスクの事業性への影響評価.....	142
6.3.1	ダイナミックキャッシュフロー分析におけるケース設定.....	142
6.3.2	計算結果と考察.....	143
6.4	事業評価におけるボラティリティとリスク分担.....	148
6.4.1	市場性リスク回避に関する現状.....	148
6.4.2	建設費リスク回避に関する現状と今後の可能性.....	148
6.4.3	オーナー・コントラクター間の建設契約とリスク分担に関する考え方..	150

6.5 結語.....	152
第7章 結論と課題.....	155
7.1 結論.....	155
7.2 課題.....	159
謝 辞.....	161

# 第1章 序 論

## 1. 1 研究の背景

自然環境のなかで人間生活の場を提供する建設技術は、種々の産業技術のなかにあつて特段に自然リスクとの対峙が主題となっていることが多い。建設工事の歴史においては困難な工事の克服が技術の発展の原動力となった。困難な工事とは、山岳地帯や都市の地下における地盤の不安定性に起因したり、あるいは河川や海岸の水域における工事が特に想起される。大規模プロジェクト技術の一部としてとりわけ地下に構築されるトンネルや大規模な掘削を伴うダムは、道路・鉄道による格段の輸送力向上や水力発電による大規模な電力供給を可能にし、多少のコスト変動が問題とならないくらい代替なき便益を、第二次世界大戦以降のわが国社会に提供してきた。

このように、かつて大規模かつ困難な建設工事が主体となるプロジェクトの実施決定は、エンジニアの技術リスクの見通しと克服の決断によるところが多く、その判断に依拠することによって、必要な資本が国家財政を背景として大胆に投入されてきた<sup>1</sup>。

しかし、建設工事を含む多くのインフラ事業に使用されてきた技術は国際的に共有されつつ発展を見せ、今や道路、鉄道、港湾、発電、など多くのインフラ事業が、技術力の制約によって整備困難であるというよりは、投資過多により経済の健全性を損ない財政資金制約による困難を迎えているのが我が国の今日的な大きな課題であると言える。インフラ整備が先進国よりはるかに遅れつつも、豊かさの可能性を求め未来に向けた国づくりを、財政による資本不足と闘いながら進めようとする開発途上国において、また、ひるがえって先進国であるわが国にあっても、行政改革は必須であり財政の効率運用を強力に進める必要が生じている。このような財政効率化の処方箋のひとつとして、開発途上国や先進国を問わず、ともに民間参加によるインフラ事業が試みられるようになっている[1]。

民間参加がもたらす本質的な価値は何であろうか。公共事業と異なり民間会社がある事業参加を決定するためには、プロジェクトにおいて現金の動き（キャッシュフロー）

---

<sup>1</sup> たとえば著者が勤務する電源開発株式会社は特別法により「只見川その他の河川等に係る大規模な又は実施の困難な電源開発」等を目的のひとつとし、昭和27年9月に特殊法人として設立され、その使命を果たし平成15年10月に民営化会社となった。

として計量される財務的な便益すなわち多くの場合事業収入と投下資本の関係において、企業財務としての健全性を確保しなければならない点が特に重要と言える。政府や公共団体に比較し、はるかに資本力に制限のある民間会社はその倒産をかけて、事業戦略の立案と緻密に洗い上げたリスク・リターン評価を必要とする。倒産を回避し成長を希求することにより営利企業が生む効率をインフラ事業にも取り組むことが、技術の克服の時代に次ぎインフラ事業が必要としている価値向上のための今日的課題と言える。

このような民間参加の交通・運輸、通信、エネルギー、上下水道事業などのインフラ事業は世界で増加しており、1984-2002年における世界の民間参加インフラ事業の設備投資額は4,874億ドルを超え[2]、また途上国インフラ投資に占める民間部門の比率は96年時点で10～15%とされている[3]。従来のように国家の事業として実施されるプロジェクトに建設やコンサルティング業務の機会を得るのとは異なり、PFI（Private Finance Initiative）<sup>2</sup>などのスキームの採用により、民間事業者がどのように建設時のみならず供用開始後の事業（操業）期間全体にわたるリスク管理によってリターンを得ていくのか、投資を行う企業経営者や当該事業にスポンサー会社の保証なくリスクをとって融資する銀行が、どのように事前のプロジェクト評価を行うかがプロジェクト成立の鍵を握る。ここでは従来のスキームによってプロジェクトオーナーに属したエンジニアが行った事業判断とは異なり、エンジニア達の技術リスク評価の役割は一層重要であるが、それは事業決定の要素でしかない。

PFI事業における資本構成はスポンサー企業（親会社）が投資した株主資本と民間銀行ローンで構成するプロジェクトファイナンスが中心的である。プロジェクトファイナンスはローンの元利返済の源泉を単一プロジェクトのキャッシュフローに求め、担保としては当該プロジェクト会社の資産に限定した銀行融資を伴うものである[4]。すなわちスポンサー企業の返済保証を原則として求めないノンリコースファイナンスがプロジェクトファイナンスの原則的な手法である。現実のファイナンスはリスクファクターによっては一部スポンサー企業が保証を行うことで、融資銀行とリスク分担を行うリミテッドリコースファイナンスが多用される。またさらにスポンサーのリスク分担が太宗を占めるコーポレートファイナンス<sup>3</sup>は、事業の失敗があつたとしてもスポンサー企業

<sup>2</sup> 社会インフラの建設・維持管理・運営を民間主体で行おうという新しい手法。1992年に英国で導入されたのが最初で、日本では1999年7月に「民間資金等の活用による公共施設等の整備等の促進に関する法律」、いわゆる「PFI推進法」が成立。PFIにおいてはプロジェクト関係者間で適切な役割分担を行い、事業の長期的継続を確実なものとするため、その資金調達にはプロジェクトファイナンスを採用することが一般的である。

<sup>3</sup> 銀行が貸付け先企業の資産内容、事業目論見等を総合的に判断し融資を行う企業向け融資を指すが、プロジェクトファイナンスと対比的に述べられる場合はスポンサー会社の資産が担保されることを特徴的に示唆している場合が多い。



の資産に銀行が債権の保全を委ねているファイナンスであると言え、銀行の調査対象はプロジェクトそのものよりも親会社（債務保証会社）の信用力に判断の比重がかけられる。

事業会社でなければ見抜けないリスクは事業会社がとるのは合理的であるが、リスクファクター別に最もそのリスクをマネジできる参加者（銀行、政府、保険、コントラクターなど）に発現リスクをリコース（遡及）していくことによって、各種のリスクの顕在化による資産価値の毀損を軽減できることや、総プロジェクトコストのうち資産として自らのバランスシートに計上する額を小さくし企業財務の流動性を高めることができるプロジェクトファイナンスは事業者の事業意欲増嵩に寄与する。

これまで政府や自治体がほとんどすべてのリスクファクターの遡及先として位置付けられた公共事業では、その大きな財務的耐力ゆえに安易なリスク回避による費用転嫁が行われ、結果として多くのプロジェクトのコストオーバーランを許してきたと言える[5]。公共事業の民活化、とりわけプロジェクトファイナンスの適用は、各種のリスクファクターの対処に得意なそれぞれの民間プレーヤーが、構造化された契約<sup>4</sup>のもとでプロジェクトの実施体制を構築するため、全体として緊張感のあるプロジェクトマネジメントが期待される効用を生む。民活プロジェクトでもときに必要な公共へのリスク遡及は、このような民間で対処可能なリスクファクターを取り除いた上で行われることが適切である。それでもなおまだ民間企業が取りきれないリスク分担が公共側に必要な場合があるが、あくまで十分なリスク分析の後にそれは決定されるべきであろう。

近年、金融工学<sup>5</sup>の発達により、株価や金利などの市場におけるボラティリティ<sup>6</sup>を定量的に評価し、将来価格の確率的表現や、マルコフ過程を発展させたブラック・ショールズ過程などを用いて計量的な予測をすることにより、企業や銀行の経営判断に役立てることが一般化してきている。民間銀行においては特に、BIS規制<sup>7</sup>によって銀行業務における市場リスク<sup>8</sup>の管理が1998年に国際的に導入され、市場リスクの計量化は銀行経営にとって必須となっている[6]。

---

<sup>4</sup> 「プロジェクトファイナンス」に比べ、よりリスク分担の概念を明確にした「ストラクチャードファイナンス (Structured Finance)」という用語が使われる場合がある。

<sup>5</sup> 金融工学は、金融の機能的効率性とリスク評価に関わる思考・知識・技術体系を創造する学問である。したがって学際的な学問として、経済学、会計学、保険学、金融論、法学、統計学、工学、コンピュータサイエンス、数学等多くの既存の学問領域に関係する（京都大学金融工学研究センター）。

<sup>6</sup> リスクと称するときは経済的に下振れ（ダウンサイドとなる）する場合を述べているが、ボラティリティと称するときは上振れ（アップサイドとなる）も含めて変動することを指している。

<sup>7</sup> BIS(Bank of International Settlement, 国際決済銀行)は銀行監督に関し先進10カ国による合意「自己資本測定と基準に関する国際的統一化」を成立させ発展させてきた[5]。

<sup>8</sup> 商品、利子率、為替などの市場価格の変動に起因する変動リスクと、市場における売買に障害があることによって起こる流動性リスクがあるが、ここでは前者の意味を指している。

市場リスクのモデル化にはいまだ研究者による議論が行われ、評価手法の定着をまだずして運用されている。ひるがえって、建設における地盤リスクをはじめとする自然リスクについては、おもに公共事業や大規模な電力などの公益事業等において処理されてきており、その事業への影響は通常の企業経営レベルで論じられることはあまりなかったといえる。このために水力発電など建設工事が大きな比率を占める事業においては、市場リスクに細心のマネジメントを行う民間の投資家や融資をする民間銀行からはその馴染みの薄さもあり、建設コストのボラティリティについて信頼感ある評価がなされているとは言えない現況にある。

本研究は上記のような背景から、建設リスクのうちとりわけ定量化が難しいとされてきた地盤リスク計量のモデル化を試み、一方、経験的な予備費ではなくモデルによって評価されたコストのボラティリティを他の市場リスクとともにキャッシュフローモデル<sup>9</sup>上に組み入れることによって、資金の多くを建設工事に使用する民間事業に対する投融資評価について議論するものである。

## 1. 2 民活インフラプロジェクトの国際動向

民間が参加したインフラプロジェクト<sup>10</sup>は世界の開発途上国で 1990～2001 年の間に、表 1. 1 および表 1. 2 に示すようにプロジェクト数で 2, 494, 総投資金額で 7, 541 億米ドル（2001 年ベース）に達している。分野別に見ると通信セクターの民営化が全体の 44%を占めているが、土木工事に関係するセクターとして電力、ガスパイプライン、空港、港湾、鉄道、有料道路、上下水道で 4, 237 億米ドルが資金投入されている。民間の参加には操業時における運用・保守を民間委託するものも含まれ必ずしも建設工事が民間資本で構成されるプロジェクトとは限らないが、いずれの場合も事業経営が民間手法で行われることを意味しており、より厳格な収支管理が必要な事業と言える。

<sup>9</sup> 狭義には企業会計における財務諸表のうちキャッシュフロー計算書を指すが、一般的にはコンピュータによる表計算シートを用いて、事業会社の財務 3 表を含めた分析モデル全体を指すことが多い。

<sup>10</sup> ここで述べる民活参加インフラプロジェクト（PPI, Private Participation in Infrastructure）は建設、操業のどちらかもしくは両方に民間企業が参加したインフラプロジェクトを指す。投資額は民間のみの投資額ではない。また対象国は 2000 年時点で低・中所得国と分類された 157 カ国であり先進国は含まれていない。

表 1. 1 途上国民活インフラプロジェクトへの投資額推移

金額単位:US\$ billion

年	通信	電力	天然ガ スパイ ライン	交通・運 輸	上下水 道	東アジア・太平洋	欧州・中央アジア	ラテン アメリカ・カリ ブ諸国	中東・北 アフリカ	南アジア (サハラ 以南)	合計	プロ ジェクト 数
1990	6.2	1.3	-	10.3	-	2.6	0.1	14.6	0.0	0.4	17.8	65
1991	13.5	1.3	-	3.3	0.1	4.3	0.4	12.7	-	0.8	18.2	31
1992	7.9	8.9	4.0	4.6	2.0	9.6	1.4	16.2	0.0	0.1	27.3	87
1993	10.9	11.1	4.6	5.7	7.9	14.6	1.5	19.0	3.6	1.4	40.1	272
1994	20.3	15.2	1.8	8.9	0.5	18.6	4.3	19.2	0.4	3.3	46.6	242
1995	20.1	20.9	4.1	12.0	1.8	24.7	9.4	19.7	0.1	4.1	58.9	271
1996	29.7	30.6	3.0	17.4	1.9	33.2	12.2	28.8	0.4	6.5	82.6	313
1997	45.4	48.7	3.3	21.7	9.3	41.3	15.7	54.3	5.6	6.7	128.4	361
1998	57.3	24.6	6.5	18.4	2.4	12.2	12.9	75.6	3.2	2.7	109.3	275
1999	43.3	14.4	3.7	8.9	6.9	16.0	9.9	38.7	2.9	4.9	77.1	215
2000	45.3	25.5	2.3	11.6	4.8	16.9	22.8	38.3	3.8	4.2	89.4	214
2001	31.7	10.8	1.2	12.4	2.3	16.6	6.5	23.3	2.8	4.6	58.3	148
計	331.4	213.2	34.5	135.3	39.8	210.6	97.1	360.6	22.8	39.6	754.1	2494
比率(%)	43.9	28.3	4.6	17.9	5.3	27.9	12.9	47.8	3.0	5.3	100.0	

出所: 世界銀行データを著者が編集したもの

表 1. 2 地域別途上国民活インフラプロジェクトへの投資額

金額単位:US\$ billion

地域	通信	電力	天然ガ スパイ ライン	空港	港湾	鉄道	有料道路	上下水道	合計
ラテンアメリカ・カリブ諸国	163.2	89.5	19.6	7.1	5.7	17.9	36.9	20.7	360.6
東アジア・太平洋	65.0	68.6	6.0	2.6	8.8	10.1	34.1	15.3	571.1
欧州・中央アジア	64.9	19.1	4.7	1.5	0.7	0.3	2.6	3.3	307.7
南アジア	14.6	22.1	0.2	0.1	1.8	0.0	0.5	0.2	136.7
中東・北アフリカ	8.1	9.0	3.9	0.7	0.9	0.2	0.0	0.1	62.4
アフリカ(サハラ以南)	15.7	4.8	0.1	0.3	0.2	0.3	1.9	0.2	46.2
計 (1990-2001年)	331.4	213.2	34.5	12.5	18.0	28.8	76.0	39.8	754.1

出所: 世界銀行データを著者が編集したもの

地域的には東アジア・太平洋地域が最も多く、同地域に 5,711 億米ドルが民活インフラに投資されている。近年ではフィリピン国においてサンロケ多目的ダムプロジェクト（総工費約 10 億米ドル）において堤体積 4,000 万 m<sup>3</sup>の大規模ダムを含めたEPCターンキー契約<sup>11</sup>が電力受給契約やローンアグリーメント等の他の契約群とともに 1997 年プロジェクトファイナンス方式による資金組成が完結し、2003 年には成功裏に運転開始した[7]。

鉄道の分野では我が国近隣の先進地域において京釜高速鉄道（韓国）や台湾高速鉄道（台湾）などで土木工事のターンキー契約を前提とした民間事業への取り組みが行われている[8]。また旧来の OECD 先進諸国においては国、民間ともに豊富な資金力を背景にインフラ建設が進められている。

表 1. 3 水力 BOT プロジェクトの例

Project	Country	(MW)	Layout	Contract	Status
Casecanan	Philippines	150	Underground P/S	EPC	Construction('00)
San Roque	Philippines	345	Dam(200m) Tunnel	EPC	Operation('03)
Bakun	Philippines	70	Surface	EPC	Operation('01)
Theun Hinboun	Lao PDR	210	Surface +Tunnel	Non EPC	Operation('98)
Houay Ho	Lao PDR	150	Dam(77m) +Tunnel	Non EPC	Operation('00)
Khimti I	Nepal	60	Underground P/S	Non EPC	Construction('00)
Birecik	Turkey	672	Dam (62m)	EPC	Construction('00)
Ita	Brazil	1, 450	Dam (125m)	EPC	Construction('00)
Guilman-Amorin	Brazil	140	Dam (41m)+Tunnel	EPC	Operation('98)

- 注： 1) 著者の調査および参考文献[9]により整理した。  
 2) レイアウト欄カッコ内の数字はダム高さ。  
 3) 内容は少なくともファイナンス・クローズし、それより進展していると報じられている案件を掲載。これ以外に開発権取得段階の案件は多数ある。また既存プロジェクトの買収による民営化案件は含まれていない。

<sup>11</sup> Engineering, Procurement and Construction (EPC) を 1 社がすべての責任をカバーして受注し、かつ性能規定によって工事内容について原則的に精算を行わない契約。プロジェクトファイナンスによる資金スキームにおいては事業の財務的確からしさが事前に求められるため一定の機能を決まった額で購入する手法が必要であり、このことを一般に EPC ターンキー契約と称することが多い。

さらに土木工事が主体となる建設工事が特徴的である水力発電分野においては、前述のサンロケ多目的ダムプロジェクトの他にも表 1. 3 に示すように、国際的な電力セクターの民営化に伴い民間プロジェクトとして建設されている[9].

本論文でケースプロジェクトとして取り扱おうとする水力発電分野については、大規模な土木工事と民間事業としての発電事業の組み合わせであり、工事のリスクと事業性について特に検討対象として興味深い。

歴史を振り返ると 1.1 緒論で述べた公共事業の如く、水力発電開発はダムやトンネルなどの土木工事を通じて多くの人々に雇用機会を提供しつつ、付随的に実施される道路・鉄道の整備により地域開発の役割も担った。水力開発は種々の製造業と比較しても大規模な資金が必要であり、多くの国で民間部門による事業化が困難である時代を経た。今日なお発展途上国においては経済開発の面でこのような過程にある国も多い。また経済発展の初期であるがゆえに水力発電に適した効率のよい地形的・水文学的特性をもつ地点がいまだ存在する。環境保護、地域住民との共生の観点から十分な評価と対策を行った上で、いまま世界銀行をはじめとする多国間援助機関や日本などの 2 国間援助機関による ODA<sup>12</sup>により、当該国政府の公的部門が水力発電開発を行っている、もしくは検討している[10].

その一方、経済の発展段階の観点から官民の資金分担の段階的な調整として ODA 開発と純粋な民間発電事業の中間的なスキームとして BOT<sup>13</sup>方式による開発が多く発展途上国で実施されている。途上国の発電事業に限らず、先進国にあっても自治体において BOT 方式はサービスの向上と公的部門の財務構造改革のためにその手法が用いられることがある。1980 年代に始まったイギリスの民営化政策の成功、旧ソ連に象徴される計画経済の破綻、これらを背景とした IMF<sup>14</sup>・世銀の構造調整政策<sup>15</sup>による途上国経済における自由化政策[11]、それに伴う民営化促進政策の強化によって、今日多くの開発途上国で BOT 方式により官民の分担構造を変化させつつある。とりわけ発電セクターにおいては IPP<sup>16</sup>として外国の民間事業者による直接投資が電源開発の主役になりつつある。

ODA から民間主体への移行にあって多国間援助機関の発電セクターへの関わりも変

---

<sup>12</sup> Official Development Assistance. OECD が認定する政府開発援助。

<sup>13</sup> Build, Operate and Transfer.

<sup>14</sup> International Monetary Fund.

<sup>15</sup> 1980 年より世界銀行が開始した途上国の市場経済化による成長戦略と経常赤字改善のための経済政策で、貿易の自由化や財政の負担となっていた公共インフラ部門の民営化政策が含まれる。

<sup>16</sup> Independent Power Producer. 発電所ごとに独立した発電会社とし系統に電力供給する。既存の電力会社に競争環境を与える効果が考慮された制度として国内外で広く普及している。

化している。世界銀行グループにおいてもIBRD、IDA<sup>17</sup>による直接借款ではなく、民間を中心としたファイナンス組成において途上国政府の信用補完をすることでIFC<sup>18</sup>が中心となって電力セクター支援の役割に主軸を移している。従って民間事業者、民間銀行の投融資の決定メカニズムが極めて重要である。発電事業に専門的な知見を常駐させているわけではなく他分野に対しても企業による事業経営の財務的健全性という統一的な目で融資を決定する民間銀行の評価はプロジェクト成立において決定的な要素ともいえる。今日水力開発において環境と住民対話が軽んじられることはないが、民間銀行の事業評価以前に、民間事業であってもODA開発で主役を果たしてきた政府、公的金融機関、コントラクター等の努力が先行してしまっている事例が散見される。また公的部門が政策的に意義を認めた水力特有の系統運用上の意義や地域開発効果などは、民間事業として設定された以上は金銭で計量されない限り民間資金を動員する上では捨象されることに注意を要する。

### 1. 3 民間事業における建設工事リスク評価

民活事業における建設コストについては、表 1. 3 に示した水力発電所建設の契約形式をみてもEPCターンキー契約が多い。このインフラ事業を発電プラントという面から見ると、近年進んだ環境技術を駆使した大型石炭火力や、天然ガスの開発・供給体制の普及によるガスタービン・蒸気タービンを組み合わせたコンバインド・サイクル発電（CCGT<sup>19</sup>）によって高効率のプラントがあり、これらは水力発電プラントに競合する。このような火力発電所を構成する技術はパッケージ化され、生産プロセスの大半が先進国の工場に進み現地では据付が中心となる。現地で構築する土木工事を多量に含む水力発電プラントに比べ火力プラントは品質管理が行き届きやすく相対的にEPCターンキー契約を実現するための条件が整っているといえる。

地質が一樣で地下リスクが予見されないような工事であれば、工場製品に固定価格をあてはめると同様に土木工事を固定価格にすることが可能であるといえる。しかし、地質の変化が予測されるだけで、現在の土木技術で施工可能であるにもかかわらず、工事費をある範囲で表現できないことがプロジェクトファイナンスを困難にしているの

---

<sup>17</sup> International Development Agency. 第2世銀ともいわれ無金利による長期ローンを提供する。これに対しIBRD(International Bank for Reconstruction and Development)は国際復興開発銀行であるが、これらを総称して世界銀行(The World Bank)と称する。

<sup>18</sup> International Finance Corporation. 世銀グループにおいて途上国民間事業を支援する。

<sup>19</sup> Combined Cycle Gas Turbine. 主に天然ガスなどを燃料とし高圧・低圧のタービンの組み合わせで高効率を実現している。

が現状であり、著者の研究動機でもある。

近年、地盤の諸特性を統計的に扱う研究が進んでおり地下リスクを含む工事費を確率密度関数で表すことができたならば、現行の土木工事保険よりも合理的に異常な工事費増をヘッジングできる仕組みを構築できる可能性がある。この考えのもとに多くの工事を組み合わせることによって異常な工事費の変化の影響を事実上なくし、ホスト国政府、スポンサー、EPC コントラクターの誰かが、それでも残るが極端に低い偶発事象発生時の銀行債務への保証を行うことができ、プロジェクトファイナンスの可能性が広がる。地質を確率・統計学的に扱った一例として、クリギング手法により淀川下流（大阪府）の河川敷きにおいて限られたボーリング調査結果を用いて、地下の任意の場所における情報を表現することが試みられている[12]。

プロジェクトファイナンスにおいて予定利益と債務返済をいかに確実にするかを追求するためには、新しくて効率の良い（かもしれない）技術ではなく、実績の多い設計や工法による信頼度の高い工事が望まれる。在来技術による建設は契約すべき EPC コントラクターの選択肢をひろげ、完工リスクを低減できると考えられるからである。この観点から、新技術の開発をあわせ行うようなプロジェクトにおいては、プロジェクトファイナンスは適さないといえる。土木工事は工場製品と異なりサイト固有のリスクが潜在するため、新技術がそのプロジェクトの工期遅延やコストオーバーランの原因になりうる。今後の土木工事分野へのプロジェクトファイナンス適用の広がりがあるとすれば、このことに注意する必要がある。

## 1. 4 市場リスクと金融工学

プロジェクトリスクを論じる上で、企業会計の立場から「資産<sup>20</sup>」について整理をしておきたい。この資産が事業リターンの源泉でもあり、種々のリスクに晒されリターンを生まないだけでなく巨額の損失の原因にもなり得る。

たとえば、近年発達を遂げた金融工学は、銀行、保険会社や証券会社などが保有したり管理することによって手数料収入を生む資産、すなわち債権や株式などは金融資産として、これら企業の貸借対照表の資産の部に計上される。夥しい数の金融商品で構成される銀行（会社）全体の資産のリスク量の把握がなされ、自己資本の裕度によって資産価値の変動に対して過少資本とならないようにバランスさせることができなければな

---

<sup>20</sup> 企業会計における貸借対照表の左側に相当する。第 6 章において詳述する。

らない。たとえば貸出した担保付ローンの返済が滞り、かつ担保（歴史的に日本の銀行が担保として重用してきた土地など）の価値が低下した状態、いわゆる大きな不良債権の存在が銀行経営を圧迫する（すなわち相対的過少資本となる）という 90 年代から 2000 年初頭に日本の金融セクターにおける大きな問題が顕在化した。銀行にあつては担保としてであれ資産としてであれ「土地価格」というひとつの種類の市場価格に連動した資産を多く保有したため、資産価値を守ることが著しく困難になったことが想起される。一方で、日々変動する金利や為替などがオプション価格評価を代表とする無裁定金融価格モデル、換言すればマルコフ過程を基礎とするリスクの時間軸上の評価を可能にした金融工学の発達により、多くの貸付けローンや債券などの金融資産のリスク計量が可能となり、大数の法則に基づくリスク管理が可能となった。このことが、土地担保等に依拠しない、ややリスクなプロジェクトに対しても銀行融資が可能となった一因と考えられる。

事業者、融資者ともにリスクにさらされる事業収入は、基本的にはそのサービスの対価の源泉となる市場から得るが、電力、有料道路、水道ではそれぞれに収入の確からしさが異なる。電力は送電線を通じて、比較的広域に発電所（事業個所）が散らばり各発電所からの供給が競合的に集合される。従って PPA に守られた発電事業と競争市場における発電事業でリスク構造が大きく異なる。これにくらべ、有料道路においては地域において設備が競合になることはほとんどなく、市場リスクは比較的小さいといえるが、周辺の人口移動や新たな交通機関出現による自動車台数の変化が起こりうる。水道事業においても、供給者同士の競合はあまり考えられず、その他の要因による長期需要の変化がありうる。こうした長期変動に対しては、公的部門が価格・量についてあらかじめ事業主に保証することが、設備投資型の事業への民間投資インセンティブになりうる。

ただし長期的ないかなる約定に基づいても、現実には電力需給環境、交通量、水需給に変化が生じた場合、そのリスク分担を行った側において既契約の約定の変更圧力が発生するため、リスクの顕在化につれ結局事業が脅かされることになる。従って長期の需給についてフィージビリティスタディの段階で可能な限りリスクファクターの抽出を行い吟味しておく必要がある。このような長期の市場リスク分担をしているのは事業者、政府（公共機関）、融資者、OM コントラクター等である。

このようにすべてのプロジェクトリスクに対し資金提供側が対処できるわけではないが、地盤リスクに代表される建設リスクに計量の可能性があるならば、金融工学がファイナンスに果たした役割同様、今後の建設工事を伴う事業リスク管理に大きく寄与すると考えられる。



## 1. 5 本研究の目的と対象

以上述べてきた背景に鑑み、本研究の目的を再整理する。インフラ事業プロジェクトに伴う建設工事において象徴的であり、これまで計量的に論じられることが少なかった地下工事費のボラティリティを確率場において計量評価し、一方で民活事業における財務的評価の過程で問題となる市場リスクの評価を金融工学の知見に基づき行い、地下工事リスクを含め統一的な場—ここではダイナミックキャッシュフローモデル<sup>21</sup>—で事業への出資・融資を民間企業・銀行が判断するための手法を提案することを目的としている。

細分的かつ具体的な目的として以下の内容を含める。

- ①線状および空洞状の地下構造物の地質リスクに対して、地表での既知情報や事前調査結果から岩盤分類を推定し、さらに岩盤分類と必要な支保工費の関係をを用い、まだ見えぬ地質要因による工事費のボラティリティを確率表現すること。
- ②そのために空間データのモデリングの手法であるクリギング等の手法の適用性に関する検討を行うこと。
- ③建設プロジェクトのプロジェクトリスクとそのリスク・ミティゲーション策を整理し、リスク計量すべき項目を抽出すること。
- ④地盤リスクを含め計量されたリスクについて、企業や銀行が事業への投資・融資を決定するプロセスを確率変数を用いてモデル化し、対象とするリスクファクターについて比較的な検討を行うこと。
- ⑤これらの過程を実在のプロジェクトを題材としてケーススタディで検証し、地盤のリスクが民間事業としての事業評価に与える財務的影響について考察を行う。

## 1. 6 本論文の展開と構成

本論文においては事業リスクを構成する2種類のリスクの評価に重点が置かれる。すなわち、建設リスクおよび市場リスクの計量と、それらを統一のルールに従って事業評価モデル上で取り扱い、最終的にケースプロジェクトによって事業評価の検証を行って

---

<sup>21</sup> キャッシュフローモデルに与えるパラメータを確率変数として与え、目的とする変数も確率的に捉えようとするモデル。

いく各プロセスを段階的に各章で展開していく。この全体像を図 1. 1 に表わす。また、この流れを論理だてる研究の構成を図 1. 2 に示す。

第 2 章においては、建設リスクに関する既往の研究成果を整理し、地盤に起因する建設工事費の変動評価の現状を明らかにする。しかるのち地盤リスクを確率分布によって計量的に表現する手法について考察し、第 3 章で展開する前提条件を形成する。一方、プロジェクトの建設段階および操業段階には、力学的・空間的条件に左右される工事数量・単価リスクのほかに、経済的・商業的背景に基づくプロジェクト収益、調達資機材、労務費などの市場性の価格変動がある。本章ではこれらの処理に関する既往の考え方および研究について整理しその問題点を明らかにし、第 4 章における市場リスク評価の前提条件を準備する。

第 3 章においては、トンネルおよび地下空洞を構築する地下工事を対象とし、地盤リスク要因に起因する建設コスト変動特性を総合的に評価する手法を提案する。具体的には、操業段階のリスク評価が、平均変動量周りの変動特性を表わす指標（以下ボラティリティと称す）により実施されることから、地盤統計学を用いたリスク評価手法に加えて、新たに金融工学の分野で用いられるリスクカーブの概念を用い、地盤条件に起因する建設コストのボラティリティを評価する手法を示す。

第 4 章においては、プロジェクトを民間事業として実施する際に認識しなければならないリスク全般について検討を加える。さらに、自由市場によって取引される、為替、物価、金利など各種の市場リスクのプロジェクト評価への影響について検討する。民間企業および銀行においては、それぞれ事業資産、あるいは金融資産である債権がリスク資産<sup>22</sup>であり、プロジェクトを取り巻く企業・銀行のそれぞれの計量的リスクマネジメントのあり方について述べ、さらに合理的な投融資の基準について考察する。

第 5 章、第 6 章においてはアジアにおいて公的部門が開発した実在する揚水発電所プロジェクトを PFI 事業として開発することを仮定して、第 4 章までに提案した建設工事費の変動および変動金利等の市場リスクに着目し、その民間事業としてのフィージビリティを検討する。

第 5 章においては、実際の揚水発電所建設をケースプロジェクトとし、この建設リスクのうちでもこれまで計量的な検討があまり行われてこなかった地下工事について、ボーリング調査結果より推定される地盤条件の信頼性を定量化する手法として、地盤統計学の代表的な手法であるクリギング手法を適用する。実際の地盤での適用結果に基づきその手法の適用性について考察を加えるとともに、第 6 章で行う総合的な事業評価のた

---

<sup>22</sup> 貸借対照表の「資産の部」に計上される資産は事業の源泉であるとともにリスクを内包している。

めに、工事費の地盤に起因する財務指標のボラティリティを確率的表現によって準備する。

第6章においては、プロジェクトの種々のリスクファクターの事業性への影響を調べ地盤リスクとの比較を行う。市場リスクとして象徴的な事業資本として調達するローンの変動金利について、マルコフ過程を規範としたブラック・ショールズ過程を用いた種々のモデルを検討し、将来キャッシュフローのボラティリティ評価を行う。あわせて地盤に起因する工事費のボラティリティを共通のキャッシュフローモデル上で比較検討し、プロジェクトファイナンスによる事業投資・融資において地盤リスクがどのようなインパクトを与え、またどのように理解されるべきかについて考察する。

第7章において、本研究の結論を述べる。また建設技術者に対してPFIという新たな土俵における建設管理の在り方について提言し、今後の課題を整理する。

なお、本研究は自然科学の一部としての土木工学分野において新しいプロジェクトリスク評価のあり方を論じようとするものであるが、その方法は社会科学の一部である経済学や経営学の領域から派生した金融工学を多く参照するものであり、特に経済学・経営学に相当する部分については十分に一般化された知識であるかどうかには留意しながら取り扱うこととし、また用語の意味等についてもその都度脚注によって確認を行いながら論文記述することに努めた。

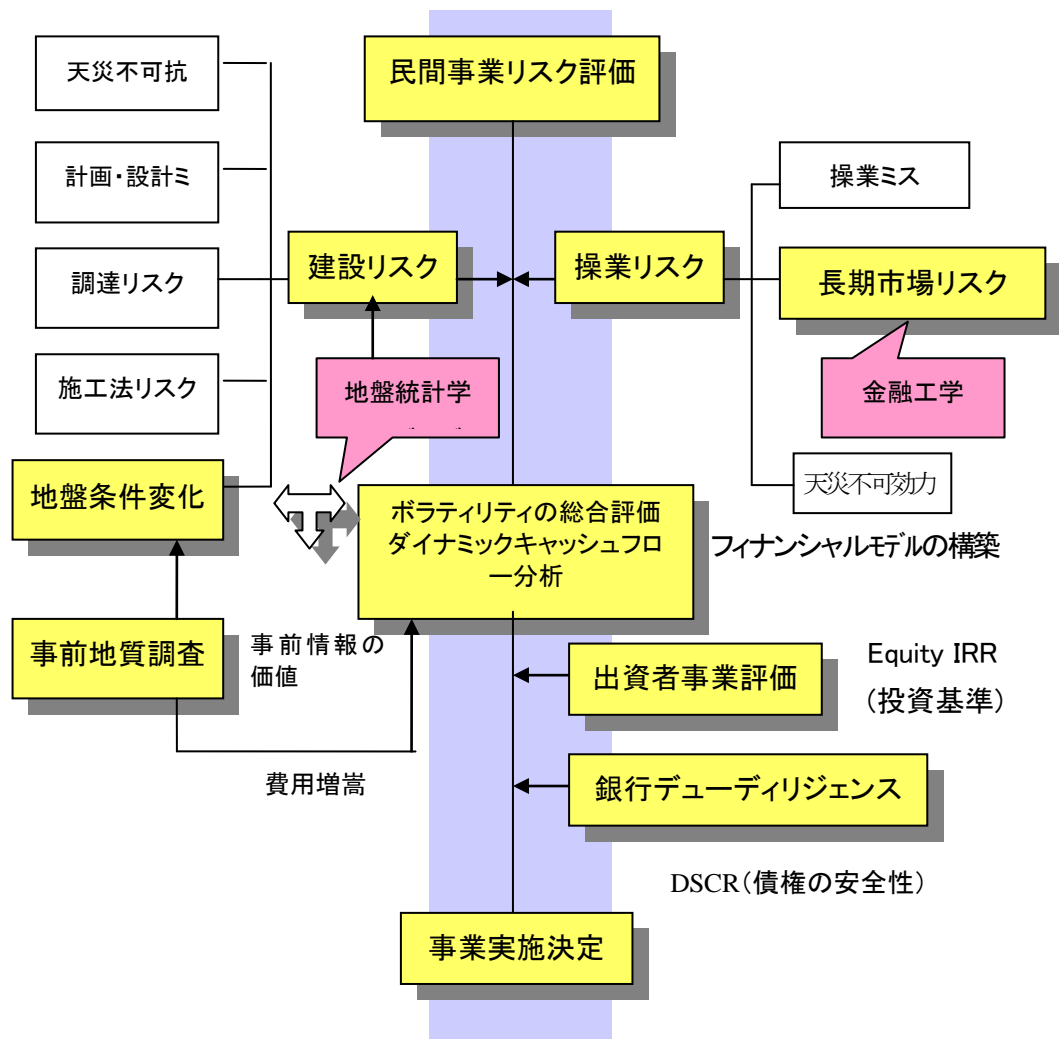


図 1. 1 事業決定プロセスの概念

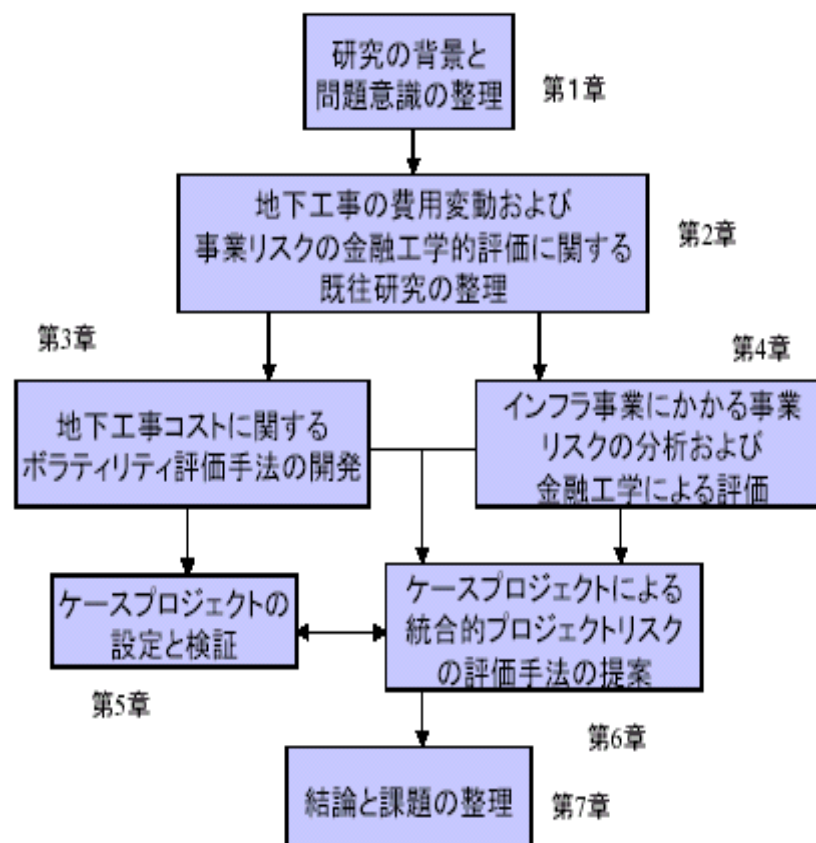


図 1. 2 研究の構成

## 参考文献

- [1] The World Bank : Private Participation Infrastructure - Trends in Developing Countries in 1990・2001, Public-Private Infrastructure Advisory Facility, 2003.
- [2] The World Bank : PPI Database, 2004.
- [3] 国際協力銀行:新興市場国の民活インフラ事業促進に政策提言, プレスリリース, 1999.
- [4] Pollio, G. : International Project Analysis & Financing, The University of Michigan Press, pp.88, 1999.
- [5] 草柳俊二: 国際建設プロジェクトのマネジメントシステム構築のための基礎研究, 土木学会論文報告集, No. 546/VI-32, pp.101-112, 1996.
- [6] 山下智志: 市場リスクの計量化と VaR, 朝倉書店, pp.5, 2000.
- [7] 国際ハイウェイプロジェクト推進委員会
- [8] 橋本徳昭: 電力会社初の海外水力 IPP 事業, 土木学会誌 Vol. 88, No. 9, pp.57-60, 2003.
- [9] Head, C. : Financing of Private Hydropower Projects, World Bank Discussion Paper, No. 420, The World Bank, 2000.
- [10] 国際協力銀行:新興市場国の民活インフラ事業促進に政策提言, プレスリリース, 1999.
- [11] Sachs, J. : Trade and Exchange Rate Policies in Growth-Oriented Adjustment Programs, Proceedings of a Symposium, February 25-27, International Monetary Fund and The World Bank, pp.251-325, 1987.
- [12] 大津宏康, 尾ノ井芳樹, 大本俊彦, 大西有三, 西山哲, 黄瀬周作: PFI 建設プロジェクトでの地下リスク評価及び分担に関する研究, 土木学会論文集 No. 721/VI-57, pp.193-205, 2002.

## 第2章 インフラ事業におけるプロジェクトリスクに関する研究

### 2.1 緒言

社会基盤（インフラ）整備<sup>1</sup>プロジェクトのうち建設工事が多く含まれるプロジェクトを対象として、本研究が対象とするプロジェクトリスクの概念をはじめに規定しておきたい。

建設技術は自然災害から人々の安全を守るため、また構築物の安定を確保するために、身近にリスクを取り扱う技術分野のひとつである。建設技術者が通常行う設計・施工業務は、まだ見ぬ斜面崩壊や基礎不良による構造物損傷などの災害を未然に防ぐためのリスクマネジメントそのものであり、今日的にあらたに発生した課題ではない。このようなリスクの範疇は日常的に多くの技術者は理解し対処し、あえてリスクという言葉も使用されることは少ない。技術者が次に考えるリスクは大規模地震災害、原子力発電所の事故、あるいは地盤工学とは分野が異なるが航空機事故などであり、発生確率は小さいが致命的で大規模な事故を想定する場合に論じられる。

本研究では上述したように、従来より技術者として果たしてきたリスクマネジメントに加え、昨今その考え方が普及しはじめた民間企業経営の手法を活用した社会基盤整備事業を遂行するとき新たに直面するリスクについて整理しなければならない。このリスクは人身・社会の安全に関わる事故には至らない経済ロスまで含められる。ひとつの事業を遂行する際に潜在するすべてのリスクを対象としてこれをプロジェクトリスクと規定することとする[1]。ひとつの社会基盤整備事業が計画、設計、建設、操業の各段階を経てプロジェクトサイクル<sup>2</sup>を終えるまでの間、プロジェクトの健全な存続を脅かすリスクは多様である。天災による大災害も事業を破綻させるが、小さなコスト増の積

<sup>1</sup> 本論文では社会基盤整備事業をインフラ事業と略称する。世界銀行において民間が参加するインフラ事業には Energy, Transport, Telecom, Water and sewerage を含めている。また本研究の重要な関心のひとつは地盤リスクであり、特に断らない限り、インフラプロジェクトの中でも、ダム、トンネル、道路など土木・建築の地盤における構築物が含まれる事業を強く意識している。

<sup>2</sup> 世界銀行をはじめとする途上国経済協力の現場でしばしば用いられる用語である。プレフィージビリティスタディ（マスタープランの一部であったりする）、フィージビリティスタディ、詳細設計、建設、操業のプロジェクトの各段階ごとに資金ソース、参加する機関・企業やその分担などが変化していくことを言い表している。

み重ねによって事業会社が財務的破綻に至れば、やはりプロジェクトは失敗である。民  
活時代の今日的なプロジェクトリスクは「事業会社倒産」に至るすべての変動要因とい  
える。このことが認識されないままPFI(Private Finance Initiative)が、政府の財政負担軽  
減策であったり、民間の工夫による事業のスリム化とかが抽象的概念で論じられること  
がある。民間事業会社が行うプロジェクトにおいて財務的破綻が少しでも予見されるよ  
うな場合は民間銀行によるプロジェクトファイナンスが実行されない。このことが、従  
来の公共工事と決定的に異なる点といえる。逆に厳しい資金調達環境であるPFIで成立  
する事業が、公共事業によるプロジェクトに比べ、財務的持続可能性をより担保できる  
挙証と考えることができる。このように民間事業のプロジェクトリスクにおいては、破  
綻を免れるために、従前にもまして詳細な分析が必要となっている。

このような観点から、プロジェクトリスクに関して、特に建設リスクとそれ以外の事  
業リスクを中心として、整理すべきこれまでの研究動向について本章で取り扱う。建設  
に限らず、およそ民間事業のリスクに関しては、企業の財務的安定性とリスクの観点か  
ら歴史的にその取扱いが研究され実務に供されてきている。後者のリスク評価において  
は、特に金融部門において、株価、金利、石油価格、など市場価格と呼ばれるもののリ  
スク（市場リスク）は、Merton ら[2]による市場金利の確率的予測手法の開発に端を発  
し、今日では企業の倒産確率を数学モデルを用いた評価モデルによるコンサルティング  
ビジネスが行われるまでになった[3]。株式市場や商品市場の整備によって株価、金利、  
石油価格などの数値は国際的に標準化されデータとして取り扱うために十分なサンプ  
ル数と信頼性を有するようになり、これら価格の確率的取扱いは、本研究で取り扱おう  
としている地盤リスクの確率的計量の試みとは別に、金融工学の分野において実績の積  
みあがった分野である。こうした市場リスクを中心とした事業性の評価方法もまた発展  
をとげ、特に企業が調達する資本コストと収益の両面で評価を行い投資判断することが  
通例となっている。これらの既往研究について、建設コスト変動リスクに関する既往研  
究のとりまとめの次に論じる。

建設コスト変動リスクのモデル化は、確率的取扱いの観点で、市場リスク評価方法よ  
りも未成熟であるとの認識を前提とし、既往の事業評価モデルに建設コスト変動リスク  
を織り込んでいくアプローチにおいて有効と考えられる、建設コスト変動に関する既往  
研究を取り上げる。

上述した2つの分野でプロジェクトリスクの計量を目的としているが、歴史的に自然  
科学の一部としての工学的研究と、社会科学としての計量経済学あるいは経営学を舞台  
にそれぞれ発展してきた経緯がある。後者においては株式や債券などの資産リスクにつ



いて金融、会計の知識を前提としているが、昨今のインフラ事業における PFI スキームによる開発が普及するなど、技術者にとっても今後重要になると考えられ、あえて異分野としての注釈は行っていない。また、全般を通して本研究ではリスクという言葉はプロジェクトの経済性を論じる場合に確率統計学で定義する期待平均値  $E$  と標準偏差  $\sigma$  を意識した、計量できる、あるいはこれから計量を求める不確実性を指している（たとえば[4]）。

## 2.2 建設工事費の変動リスクに関する既往研究

本研究で議論する土木工事を中心とする建設工事リスクは、その施工過程における現場条件と当初の設計による想定との違いからくる、作業工数や材料費、およびそれに随伴するコストの変動、とりわけコストオーバーランに関するものを扱う。従来から、コストオーバーランを扱う研究は行われてきた。しかし地盤リスクと関連付けてコストオーバーランを論じたものは少ない。地盤リスクに限らず各種コスト変動要因を限定せず、確率統計的にコストオーバーランを論じる研究が支配的であった。ここに既往研究の概略の成果について記し、本研究における解明事項を明らかにする。

たとえば、Hastak ら [5] は国際建設プロジェクトのリスクアセスメント手法として ICRAM-1 (The International Construction Risk Assessment Model -1)を開発し、マクロ（あるいは国）レベルのリスク、建設産業レベルのリスク、および建設プロジェクトのリスクの3階層にわけて総計 73 のリスク要因を抽出・分類し、各要因の重み付けを階層別に行い、さらに階層間の影響度を決定し、総合的なリスクレベルの計量を試みている。無リスクから高リスクまでを 0 から 100 までの正規化された点数で表し、プロジェクトリスクの大小を表現している。個々のリスク要因に対する重み付けは評価者が主観的に行う。地盤リスクについては”Unforeseen adverse ground conditions”という 1 項目で扱われている。このモデルはあくまでもプロジェクト全体のリスクレベルを細分化された主観の総合で評価しようとするものであって、客観指標によってリスク内容を計量評価することが目的となっていない。PFI プロジェクトがリスク分担に関する契約構造によって成り立つものであるとするならば、本手法は分担論にいたらないため、参加者の意思決定には限定的な効用しかない。

Back ら [6] は EPC コントラクターの立場から 20 の大規模建設プロジェクトにおいて、準備段階(Start-up)、実行段階(Commissioning)、および竣工段階 (Project close-out)

の各段階で構成するロジックダイアグラムを作成し、それぞれの段階における情報マネジメントがコストおよび工程に及ぼす影響を、実行プランごとにコスト・工程における標準的評価から新たにもたらされる 164 に細分化されたコスト・工程への変動要素に関する情報による乖離推定を計測する試みを行っている。過去のプロジェクトの経験をベースにしているものの評価者の主観が個々の実行プランに入り、プロジェクトコストと工程に関し、当該プロジェクト固有の情報に依拠しているものではない。また地盤リスクについて明示的なリスク評価手法は論じられてない。

Paek ら [7] はコントラクターの経営的視点から、個々のリスク要因の分析ではなく、支出において固定費と変動費の配分が収入や利益（マージン）に及ぼす影響を調べている。すなわち施工機械への投資が施工経費を抑制する度合いを考察したものである。Kapila ら [8] は外国工事で建設会社が被る為替リスクの管理について考察しており、リスク対処の要諦として為替先物予約およびデリバティブによるリスク低減を提案している。これらはいずれも特定プロジェクトの事業評価において、投融資の判断を行うためのキャッシュフローモデル上で地盤リスクを計量する目的には合致しない。ただし Kapila らの指摘による為替リスクを先物予約によって回避する点については、本論文第 6 章において、ケースプロジェクトにおいて、その必要性を追認する結果を得ている。

一方、研究の目的に従い、地盤のリスクを金融工学で論じられるボラティリティと比較可能な概念として表現するためには、地下の地質条件を空間的・幾何学的分類としてとらえるための空間モデリングが必要になる。さらには、空間的分類を受けた部分の地盤の力学的特性によって掘削中の支保工のあり方が変わり、その帰結として工事費が変化する。このような目的に関係する研究として以下のような既往の成果がある。

田中はダム基礎処理工事において地質が一様でないために発生するグラウト量をクリギング手法を用いた空間モデリングによって確率評価した[9]。また、大津らは淀川河川敷における鋼矢板の根入れ長を限られた本数のボーリング情報からクリギング手法によって幾何学的に確率評価し、ボーリング情報と評価される矢板根入れ長のボラティリティの関係を論じた[10]。さらに、大津・著者らは、ボーリングや地下空洞の工事費が地下の地質要因によって変動する問題を、工事費に影響する地質変動を力学的パラメータ RMR(Rock Mass Rating)を用いて表現することによって、確率的に定量する手法を提案した [11]。本論文はこの研究の延長として位置づけられる。

## 2.3 民間事業リスクの取扱いに関する既往研究

民間事業，すなわち民間企業が主体となつて行う事業のリスクは，そのリスク発現による財務的影響を調べるのが一般的である．企業がリスクを有する事業に投資する場合の評価方法は **IRR** に代表されるように，プロジェクトの経済評価方法が一般化され，ほとんどの長期投資を伴う事業評価において用いられている（たとえば [12]）．ここではさらにプロジェクトファイナンスの実務で未だ十分取扱いが普及しているとは言い難い，土木工事費リスクや電力市場リスクなど，今後そのリスク特性を解析的に確率評価する手法として変動金利に関するモデル研究について触れる．さらに，モンテカルロシミュレーションによってキャッシュフローの構成要素を確率変数で扱うことによって実務的な事業評価が可能となったこと，さらに金融資産ではなく事業資産のリスク評価に踏み込んだ既往の研究成果について，以下に述べていく．

### 2.3.1 変動金利に関するモデル

市場価格のうち金利の研究においてモデル開発が活発に行われてきた．金利が市場でたどる値をマルコフ過程で表現する試みは金融工学の世界において多く行われてきた．いずれも将来の短期金利  $r$ ，時間軸  $t$ ，ブラウン運動がもたらす確率分布の標準偏差  $\sigma$ ，その方向を  $Z$  軸， $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$  を定数と定義して金利の増分  $dr$  を表 2.3.1 に示すような確率微分方程式により多くの研究者によってモデル化されている．K.C. Chan ら[13]はこれらのモデルを一般化した式 (2.1) における定数の値に注目して金利の期間構造(Term structure of interest rate)について研究した．

$$dr = (\alpha + \beta r)dt + \sigma r^\gamma dZ \quad (2.1)$$

表 2.3.1 金利評価のための確率微分方程式

	モデル(開発者)名	確率微分方程式	略号説明
1	Merton	$dr = \alpha dt + \sigma dZ$	
2	Vasicek	$dr = (\alpha + \beta r)dt + \sigma dZ$	
3	CIR SR	$dr = (\alpha + \beta r)dt + \sigma r^{1/2} dZ$	Cox, Ingersoll, Ross Square Root
4	Dothan	$dr = \sigma r dZ$	
5	GBM	$dr = \beta r dt + \sigma r dZ$	Geometric Brownian Motion
6	Brennan-Schwartz	$dr = (\alpha + \beta r)dt + \sigma r dZ$	
7	CIR VR	$dr = \sigma r^{3/2} dZ$	Variable Rate
8	CEV	$dr = \beta r dt + \sigma r^\gamma dZ$	Constant Elasticity of Variance

1.  $dr = \alpha dt + \sigma dZ$  (Merton)

単純なブラウン運動にドリフト成分を加えたもので、割引債価格(Discount bond)の予測評価に用いられる (1977). 算術ブラウン運動ともよばれる.

2.  $dr = (\alpha + \beta r)dt + \sigma dZ$  (Vasicek)

回帰速度  $\beta$  によって  $-\alpha/\beta$  に長期期待平均値が収束する Ornstein-Uhlenbeck 過程ともよばれ Vasicek が割引債価格の均衡モデルとして使用した(1977). このガウス過程は債券オプション(Bond option), 先物, 先物オプション等の評価にも用いられた[14][15].  $\beta=0$  とすると Merton モデルとなることがわかる.

3.  $dr = (\alpha + \beta r)dt + \sigma r^{1/2} dZ$  (CIR SR)

Cox, Ingersoll および Ross(CIR)(1985)によるモデルで利子率の大きさがガウス過程の偏差に  $\sqrt{r}$  倍で影響するとしており, 抵当付証券 (Collateral securities), 割引債オプション, 先物, 先渡しオプション価格モデルに応用される[16][17].

4.  $dr = \sigma r dZ$  (Dothan)

割引債および貯蓄率, 期間延長権付債券(Retractable bond), 買戻権付債券(Callable bond)などの評価に使われた.

5.  $dr = \beta r dt + \sigma r dZ$  (GBM)

Black and Sholes の GBM(Geometric Brownian Motion)とよばれるモデルで Marsh が金利の評価に用いた. 幾何ブラウン運動とも呼ばれる.

6.  $dr = (\alpha + \beta r)dt + \sigma r dZ$  (Brennan-Schwartz)

転換社債(Convertible bond)価格評価のための数値モデルとして扱われ, また割引債券モデル開発にも使用された.  $\alpha=0$  とすることにより GBM モデルとなる. Vasicek モデルとの違いは金利水準によりボラティリティが変化することである.

7.  $dr = \sigma r^{3/2} dZ$  (CIR VR)

Cox, Ingersoll および Ross が変動金利証券の研究において開発し, 類似のモデルによって Constantinides および Ingersoll は税効果を考慮した債権評価を行った.

8.  $dr = \beta r dt + \sigma r^\gamma dZ$  (CEV)

分散が一定の弾性を有する (constant elasticity of variance) 過程として金利評価モデル

で $\beta$ や $\gamma$ の値によって他のモデルを表現した一般化の度合いが高いモデルである。

これらの比較研究による結果は、金利のボラティリティが金利レベルに依存するようなより一般化されたモデルより、Dothan や CIR VR などの単純なモデルがより良い推定結果を与えることがあったとし、理論的なモデルの構築はいまだ限界的であると指摘している[18]。

このような背景を持ちつつも、将来の資産評価を計量的に行うための手法としてマルコフ過程型のアプローチはそのトレンド成分とランダム成分の合成において市場価格変化を本質的に表現していると思われ、本研究においても、プロジェクトのキャッシュフローの評価において、金利変動による効果を検証するために使用することとしたい。また、上述のようにモデルフィットにおいて定説は確立されておらず、ケースプロジェクトが実施された実際の国（タイ）を想定し、一定時期の金利（ヨーロッパ市場で取引される米国ドル建て債券）データを用いて、仮想融資時点からマルコフ過程による推定を実施し、実際にその後に変動した結果を比較することにより、本研究においてケースプロジェクトのダイナミックキャッシュフロー評価の妥当性を検証することとした。

ここでは、マルコフ過程を最も単純に表わした 1. マートンモデル（算術ブラウンモデル）、金利にはヒストリカルによって具現化した現実的なレベル感があってボラティリティを有しながらも一定値に回帰する考えをとった 2. Vasicek モデル（対数平均回帰モデル）、推定パラメータたる金利の値の対数がマルコフ過程に従っているとする 5. GBM（幾何ブラウンモデル）、の 3 種類について考察し、事業評価において、潜在する変動金利の動きが事業リスクに与える影響について考察する準備とする。

### 2.3.2 プロジェクトリスクの確率的取り扱い

Mohamed ら [19] は、プロジェクト実施決定において市場性リスクについてキャッシュフローモデル上でモンテカルロシミュレーションを行う有用性について述べている。また Kahn ら [20] は、BOT 事業のプロジェクトファイナンスに従事する世銀職員、インベストメントバンクの専門家、弁護士などで構成するチームが実務的観点から大型のプロジェクトのファイナンスについて説明し、やはりキャッシュフローモデルによるモンテカルロシミュレーションによる事業性のボラティリティの検討に言及している。これらは燃料費や金利などの市場性リスクについて指摘したものであり、建設時のリスクファクターに着目した確率的分析について検討しているものではない。

### 2.3.3 事業資産評価

企業による事業投資評価に関する研究は、金融市場における証券・債券に関する研究と密接に関係している。従来の投資評価に関する研究は、証券や債券などの資産に関するものが多く、プロジェクトと称されるような事業投資の評価手法は、第4章に詳述するようにそのリスクファクターの多様性（表4.2.1にとりまとめ）ゆえに、今日十分な確立を見ているとは言い難い。たとえば金融機関における内部格付けの手法として金融工学を駆使したデフォルト確率による与信評価においても、そのモデルおよび計算過程の多様性ゆえに、金融当局による査定はある事故率を商品分類に適用して資産価格の掛け目を求めている現状や、事務事故や不正行為による損失が発生するオペレーションリスクなど、そもそも計量化が困難なリスクについては掛け目方式を用いられるが、それでも先進的計量評価とされるバランストスコアカードなどの適用が言及されている[21]。かくのごとくリスク計量の試みは工学の世界にとどまらない。

## 2.4 結 語

建設投資を含む事業に関する技術者の視点から進められてきたリスク研究と、民間事業をめぐる金利や為替などの市場性リスクに関する既往研究の展開について述べたが、両者の研究が双方に言及されることはほとんどなく、いまだ距離のある別領域の研究と言わざるを得ない。しかし、プロジェクトの事業性においてはこれらが複合しており、プロジェクトファイナンスによる実務分野においては、これらを統一的に扱う手法が確立されない限り、インフラ事業を扱う SPC へのファイナンスは自然リスクに関して閉ざされた世界にとどまると考えられる。このことから、自然リスクのうち地盤リスクの分野を取り扱う本研究の必要性が確認される。

## 参考文献

- [1] 尾ノ井芳樹：講座「リスク工学と地盤工学, 4. プロジェクトリスク」, 土と基礎 52-6, pp.45-62, 2004.
- [2] Merton R.C. : On the Pricing of Corporate Debt: The Risk Structure of Interest Rates, The Journal of Finance 28, pp.449-470, 1974.
- [3] Crosbie P. J. and Bohn J.R. : Modeling Default Risk, KMV LLC, 2002.
- [4] Pollio, G. : International Project Analysis & Financing, The University of Michigan Press, pp.88, 1999.
- [5] Hastak M. : ISCRAM-1 : Model for International Construction Risk Assessment, Journal of Management in Engineering, pp.59-69, January/February, 2000.
- [6] Back W. E. and Moreau K. A. : Cost and Schedule Impacts of Information Management on EPC Process, Journal of Management in Engineering, pp.59-70, March/April, 2000.
- [7] Paek J.H. : Running a Profitable Construction Company : Revisited Break-Even Analysis, Journal of Management in Engineering, pp.40-46, May/June, 2000.
- [8] Kapila P. and Hendrickson C. : Exchange Rate Risk Management in International Construction Ventures, Journal of Management in Engineering, pp.186-191, October, 2001.
- [9] 田中誠：不均質地盤モデルの作成法とその浸透流解析への応用に関する研究, 京都大学博士論文, 1999.
- [10] 大津宏康, 尾ノ井芳樹, 大西有三, 李圭太: 金融工学理論に基づく地盤リスク評価に関する一考察, 土木学会論文集 No. 742/VI-60, pp.101-103, 2003.
- [11] 大津宏康, 尾ノ井芳樹, 大西有三, 高橋徹, 坪倉辰雄: 力学的地盤リスク要因による建設コスト変動の評価に関する研究, 土木学会論文集 No. 756/VI-62, pp.117-129, 2004.
- [12] Bodie Z. and Merton R.C., 大前恵一朗訳: Finance, First edition, 現代ファイナンス論 (改訂版), ピアソン・エデュケーション, pp.213-245, 2001.
- [13] Chan K.C., Karolyi G.A., Longstaff F.A. and Sanders A.B. : An Empirical Comparison of Alternative Models of the Short Term Interest rate, The Journal of Finance Vol. XLVII, No.3, pp.1209-1227, 1992.
- [14] Vasicek O. : An Equilibrium Characterization of the Term Structure, Journal of Financial Economics 5, pp.177-188, 1977.
- [15] Jamshidian F. : An Exact Bond Option Formula, The Journal of Finance 44, pp.205-209, 1989.
- [16] Cox J.C., Ingersoll J.E. and Ross S.A. : A Theory of Term Structure of Interest Rates,

- Econometrica, Vol. 53, No.2, pp.385-407, 1985.
- [17]Krishna R. and Sundaresan S.M. : The Valuation Floating-Rate Instruments, Journal of Financial Economics 17, pp.251-272, 1986.
- [18]蓑谷千鳳彦：ブラック・ショールズモデル，東洋経済新報社，pp.232，2000.
- [19]Mohamed, Sherif, McCowan, Alison K. : Modelling Project Investment Decision under Uncertainty Using Possibility Theory, International Journal of Project Management, Issue 19, pp.231-241, 2001.
- [20]Khan F. and Parra R. : Financing Large Projects : Using Project Finance Techniques and Practices, Pearson Education Asia Pte., Ltd., 2003.
- [21]金融庁・日本銀行：新 BIS 規制案の概要，2004.



# 第3章 地盤リスクの確率評価手法に関する研究

## 3.1 緒言

近年、金融工学に著しい貢献を行ったZvi BodieおよびRobert C. Mertonは不確実性とリスクの区別を次のように説明している[1]、すなわち「不確実性(uncertainty)は、将来何が起こるかわからないことを一般的にいう、リスクとは、その不確実性が経済的に問題となることをいう」。本章においては地盤リスクの確率評価手法を論じるが、上述の通り地盤リスクに起因する経済的帰結を扱うことを目的とする。すなわち、地下に展開される構造物の建設費が、多くの場合、施工の進展において明らかになる地盤条件<sup>1</sup>の変化に従属する部分が多いことに注目し、地質の不確実性を確率的に評価し、さらに地質や地盤種別と建設費の関連が明らかであれば、事業投資判断に必要な、潜在する地盤リスクがもたらす建設費のボラティリティ評価を行うことができる。

一般に工事費の変動要因は地下工事の地盤リスクだけではなく、当然、明かり構造物にもある。田中[2]が検討したダム基礎処理工事はその典型であり、また大津ら[3]は基盤の深さが不確実な地点における連続鋼矢板の打ち込み深さに起因するボラティリティについて考察している。このような地盤リスクが工事費変動の要因としていかなる位置付けとなっているかは、図3.2.1に示すように我が国のODAで実施されたプロジェクトのコストオーバーランの要因分析によってもうかがえる[3]。これによれば、複雑な許認可やプロジェクトのオーナーの契約遵守姿勢などがコストオーバーランの要因として一番多く位置付けられているが、これらは人間が作り出すプロジェクト環境に依拠していることによるものであり、今後の制度設計やFIDIC [4] など国際契約の規範への組織のガバナンスのあり方の改善によって減少しうるものである。しかし、地盤リスクは自然の真実の状態と人間の建設活動との相互的關係において発現するリスクであり、その把握のために自然状態の合理的な推定・評価が前提となる。

## 3.2 地盤リスクの概念

---

<sup>1</sup> 「地質条件」が地質分類によるものとすれば「岩盤分類」はむしろ施工の最適化を求めた分類であると解し、文脈に応じて使い分けることとする。さらに岩盤の領域をはずれる地盤も含め、リスク対象として総称する場合「地盤リスク」と表現することとする。

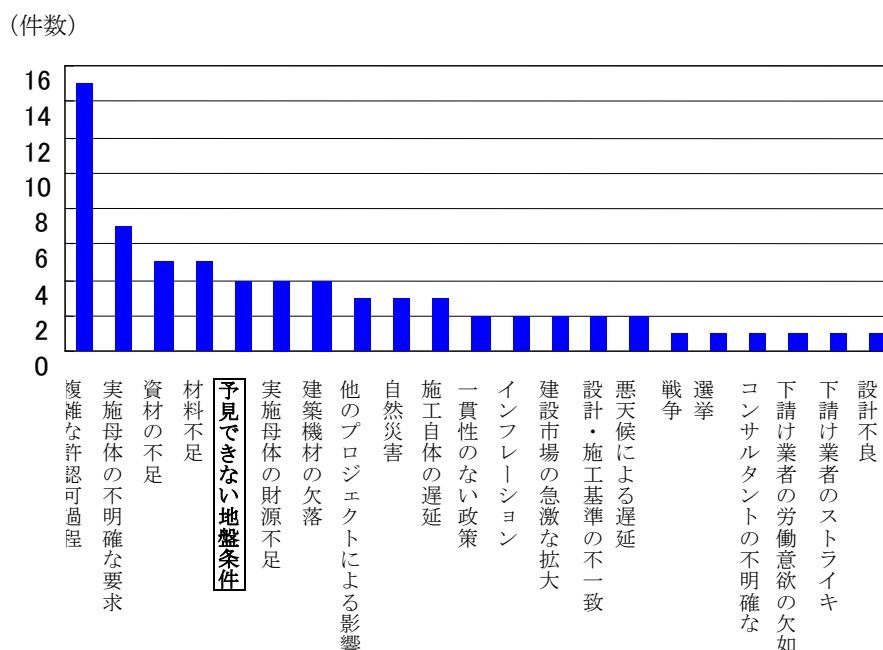


図 3.2.1 円借款プロジェクトのリスク要因別発生頻度[3]

本項においては、トンネル掘削あるいは、地下空洞掘削等の地下工事を含む建設における地下の地質条件の不確実性について解明を試みる。ここでは地質条件の変化を問題としているが、土塊あるいは岩盤の属性・分類を地質とするなら、工事費を検討する立場からは土や岩盤の属性・分類の問題ではなく、掘削や山止め工事のしやすさが問題である。この観点から用語の問題として、本研究においては地下構造物の掘削に伴う工学的リスクを「地盤リスク」と総称することとする。ただしこのような定義をした場合、地盤の緩みや土中水理学的な要因による工事費リスクも包含することとなるが、これらは本研究におけるモデル化の対象としておらず、別途考察すべき重要な課題である。いずれにしても、地質条件が地盤リスクの主たる要因であるとする立場から、本論文では各箇所記述の文脈の焦点にあわせ、「地下リスク」、「地質リスク」、「地盤リスク」の用語を適宜使用する。

設計段階で予期出来ない不良な地質条件の出現は、工法変更あるいは支保パターンの変更を伴うため、大幅な工期延長あるいは建設コストの増加に繋がる。実際の地下工事を含む建設工事では、この地質条件の不確実性に対処するため、ボーリングあるいは弾性波探査等の地質調査が実施されると共に、その調査結果に基づき設計がなされる。た

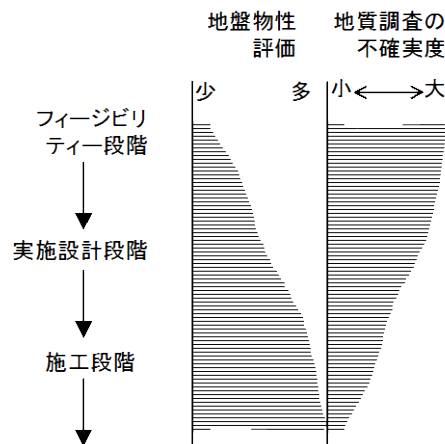


図 3.2.2 リスク要因調査と地盤物性調査ならびに地質調査の不確実性[5]

ただしここで留意すべきことは、事前調査において対象となる建設現場全域の地質を調査することは実質的には不可能であるため、設計（あるいは積算）段階の地質情報は不確実性を含んでいることである。地下工事を含むプロジェクトに含まれる不確実性の度合いは、図3.2.2に示す近藤[5]により提案されている模式図がその本質を良く例示している。すなわち、地質条件に関する不確実性の度合いは事前調査後のフィージビリティスタディ段階で最大であり、その後実施設計段階および施工段階と、地質情報が明らかになるにつれて減少するものと解釈される。また、同図に示すように、地盤リスクの変化の度合い（図3.2.2においては地質調査の不確実度と記載）は調査の質と量により変化する。このような地下工事における地質情報の不確実性は、工学的には地盤・岩盤の幾何学的不確実性と力学的不確実性に区分される。

地盤リスクの特性について整理する意味で、昨今、頻繁に金融工学で議論されるリスクの概念との比較を試みる。金融資産のリスクは、株価のように時間空間で複雑に変化し、その予測が極めて困難な値を対象とするものである。これに対して、地盤リスクとは時間空間に依拠せず空間的不均一性が高いため、図3.2.2に示したように最終的に工事が終了するまで、その建設現場固有の地質条件が確認されないことに起因するものである。すなわち、本研究で対象とする地盤リスクとは、金融分野のリスクのように将来事象の予測ではなく、理論的には建設現場におけるボーリングあるいは弾性波探査等の地質調査をできる限り詳細に実施することで対処可能となるものである。しかし、調査

に要する期間・費用等の制約から現実的には地質調査に含まれる地盤リスクを全くなくすることは不可能である。プロジェクトのオーナーは多くの支出を伴う完全な調査を待たずに事業決定を迫られることが多い。このため、プロジェクトの予算制約の下で実施すべき調査費用の最適化を図る観点からは、調査のレベルと図3.2.2に示す事前調査後のフィージビリティスタディ段階で推定される地盤リスクの度合いとの関係について、定量的に評価することが重要な検討課題となる。

一方、大津ら[6]がそれまでにおける研究で示してきたように、従来は地盤リスクに起因する建設コストの変動については、請負者に比べて資金力を有する公共団体等の発注者が、追加調査あるいは施工段階において明らかとなった情報を基に地盤・岩盤区分を精査し、その結果として単価数量表(Bill of Quantities)<sup>2</sup>に基づいて数量精算することで、請負者のリスク分担が基本的には回避される方式が採用されてきた。このため、発注者および請負者のいずれにも設計条件に含まれる地盤リスクと調査費用に対する基本概念が構築されにくかったといえる。しかし、今後の公共事業の動向として、プロジェクト数が減少する条件の下における建設コスト縮減および、設計・施工一括発注、あるいはプロジェクトファイナンスを前提としたEPCターンキーによる発注等への調達方式の変化を踏まえた場合に、地盤リスクと調査費用に対する基本概念を構築することが不可欠となる。

このような観点から、大津ら[7]は地盤リスクと調査費用の関係について検討する方法として、金融分野におけるリスク研究の場でよく使用されるリスクー期待値平面を用いて、地盤リスクの建設コストに及ぼす影響を評価する方法が有効であることを提案した。さらに、実際の地盤構造物の建設を例題として、地盤リスクの幾何学的要因に着目し、地盤統計学の一種であるクリギングを用いた検討手法により、限定した条件における議論ではあるが、調査工事の投資対効果についても定量的に評価出来る可能性があることが示されている [3]。

本研究では、以上述べた研究に加え、地盤リスクとして力学的要因に着目し、地盤統計学を用いて地盤リスクに起因する建設コスト変動と調査費用の関係を評価する手法について検討を加える。従来の研究では地盤リスク評価において、幾何学的要因については計測値を直接用いるクリギングが適用されている、力学的要因については岩盤等級等の離散値が用いられることが多いため、計測値を閾値化した値として用いて、その確率分布を推定するインディケータクリギングを適用する。さらに、この手法を用いて、実際のトンネル建設工事における力学的地盤リスクが建設コストに及ぼす影響につい

---

<sup>2</sup> Bill of Quantities は BOQ と称されることも多い。

て示すとともに、その結果に基づき調査工事の投資対効果についても検討を加える。

### 3.3 確率論を用いた地質条件の推定とモデル化

#### 3.3.1 導入

本研究では地質条件による地盤の物性、強度、さらにそれらの基準からもたらされる支保工パターンの結果、その工事費にいたるまで、ある力学的またはその帰結としての工事費などの情報を確率によって表現を試みている。Touran[8]が試みたように、単に過去の工事費データの蓄積から、そのボラティリティの原因を考慮しないでポアソン分布を用いて統計的に潜在的コストオーバーランを評価するのではなく、本研究では過去の工事群の母集団に支配されず、そのプロジェクトのための事前調査結果を直接反映させることで、個々のプロジェクトにおいてより合理性のある評価を行うことができることが特徴となっている。

#### 3.3.2 クリギング<sup>3</sup>によるモデル

地質条件を推定する手法については、これまでも多くの研究がなされてきているが（たとえば[10]）、空間データのモデリングにおいてその不偏、最適性を重視した場合、これらの中で、地質情報をその空間的なつながりから統計学的に推定する地盤統計学の1手法であるクリギング（Kriging）があげられ、既往研究においてもその有効性が示された[3]。本研究ではクリギングから派生したインディケータークリギング（Indicator Kriging）を用いることとした。地盤統計学に基づく手法を用いる理由は、地質情報の空間的な推定が容易にできることが挙げられる。つまり施工対象範囲に対し、場全体の物性値の分布形状だけではなく、各推定点における物性値を個別にしかも確率論的に求めることができるからである。これにより、仮定した各推定点における物性値の出現確率を確率密度関数で表現することが可能となり、第6章で試みるキャッシュフローを用いた事業分析において工事費のもたらす財務的影響評価を行うことができる。

インディケータークリギングの理論的背景を説明するため、本項ではクリギングの一般的な理論展開を行い、その後インディケータークリギングの特徴について説明する。その前段階として、まず、クリギングとインディケータークリギングの間における大きな違いである入力値の扱いや出力値の性状について説明する。

---

<sup>3</sup> Matheron が鉱山学の先駆者 D.C. Krige(クリッジ)にちなみ Kriging と命名した造語[9]。

クリギングにおいては、解析の際入力するデータは数値情報である必要があり、その結果として出力される値はある期待値と標準偏差にもとづく正規分布を形成する。この方法は、調査地点においてその物性値が数値として得られるもの、例えば地層境界の標高や透水係数などの値の推定には有用であると考えられる。一方、インディケータクリギングにおいては、その名の通り入力値は全てインディケータ（指標値）に変換される。つまり、解析対象とする物性値について、ある閾値(sill)を設定し、調査地点においてその閾値を超えるか超えないかの情報が、0か1である指標値として入力されることとなる。これは、値そのものが分かっていない場合、例えば何らかの計測限界が存在し、幾つかの計測地点で限界を超える値が一切分かっていない場合などに、数値情報を必要とするクリギングではその地点のデータを用いることができないが、インディケータクリギングでは閾値としてその計測限界を設定することでそれを超えるか超えないかという入力が可能となる。またインディケータクリギングを用いた場合、その推定結果は、推定点において対象とする物性値が設定した閾値を越えない確率（非超過確率）として求まる。従って閾値を数個設定することにより、その物性値を確率変数とした非超過確率分布関数が求まることとなる。

コスト推定の観点から述べれば、積算は基本的に岩盤をその性状により幾つかに分類し、その各分類に対し支保を決定することで行われるため、岩盤分類の分布形状を空間的に把握できることが理想となる。しかし、岩盤分類は離散値的な扱いを行う場合がほとんどであるため、その推定において数値情報を必要とするクリギングを用いることは難しい。さらに、岩盤分類はその評価段階において手法による差はあれ評価者の判断が影響することは否めない。個人的な判断が影響する程度が低いとされる RMR 法でさえ、E.Hoekらは評価結果にはある程度の誤差範囲があることを認識すべきであるとしている[11]。インディケータクリギングでは、閾値に対する指標値評価を用いることで詳細な数値情報が消失するデメリットがある反面、評価段階における人的な誤差の影響を少なくできる効果も期待できる。

また、上記 2 手法以外にも、本研究では用いていないが、地盤統計学の 1 手法であるコクリギング (Co-Kriging) も状況により有用性は高いと考える。コクリギングとは、必要とする物性値と相関性の高い別の物性値があり、その情報を調査により得ることができる場合に、その相関性を利用して必要な物性値に関する推定を行う手法である。地盤や地質の各種条件にはお互いに相関性が見られるものも少なくなく、また植生などの自然条件との相関性が見出せる物性値もあると考えられるので、これらの物性値を用いてのコクリギング手法も有効であろう。

以下、クリギングについてまず示し、次にその派生形であるインディケータクリギングについて、インディケータの扱いなどを中心に説明を行う。なお、詳しい式展開などについては、地盤統計学についての研究や関連図書に委ねる ([2], [10], [12], [13])。

### 3.3.3 クリギングによる幾何学的地盤リスクの評価方法

地盤統計手法においては、推定対象とする場合は、解析対象とする物性値についてある 1 つの確率分布に基づいている仮定がその出発点となる。推定対象場中のある点  $x$  に存在する値を  $Z(x)$  とし、その位置から  $h$  だけ離れたところにある点の値を  $Z(x+h)$  としたとき、両者の差の平均および分散は、

$$E[Z(x+h) - Z(x)] = m(x, h) \quad (3.1)$$

$$\text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(x, h) \quad (3.2)$$

のように記述することができる。上式においては平均・分散ともに、位置そしてデータ間距離により変化する。実現象においてはこのようになることが多いが、位置およびデータ間距離で異なる統計的性質を持つ場を推定・解析することは理論的に困難となるため、上述したように、対象とする乱数場が 1 つの確率分布に基づいている定常仮定を用いる。距離  $h$  だけ離れた値どうしの差の平均は 0 となり、分散は  $h$  のみの関数となるので

$$E[Z(x+h) - Z(x)] = 0 \quad (3.3)$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] \quad (3.4)$$

と記述できる。

仮に、 $E[Z(x+h) - Z(x)]$  がデータ間の距離  $h$  に依存するのであれば、以下のよう  
に記述できる。

$$E[Z(x+h) - Z(x)] = m(h) \quad (3.5)$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] \quad (3.6)$$

この状態は弱定常といえる。ここで  $m(h)$  はトレンド成分と呼ばれる。

このように、地盤統計学を用いる際には推定対象の乱数場をある確率場に定義することが必要となる。以下簡単のため対象場に定常仮定を用いることとする。本論で言う定常とは時間的定常ではなく位置的定常を指している。言い換えれば、場所特有の確率的性質における違いの無さであることを要する。

推定値は複数の計測値それぞれに重みをかけ、その和で表現されるが、その重みの総和が 1 となるため線形 (Linear) である。また、誤差平均  $m_R$  を 0 にしているため不偏 (Unbiased) であり、誤差分散  $\sigma_R$  を最小化しようとしているために最適 (Best) ということになる。このようにクリギングは最適線形不偏推定法であることを示している。

今、計測されたデータの値を  $Z(x_i)$  とし、各計測データに割り当てられる重みを  $\lambda_i$  とすると、推定点における不偏推定量  $Z(x_0)^*$  は、既計測データに重みをかけて足された形で、以下のように表される。

$$Z(x_0)^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3.7)$$

ここで、推定点における真値が  $Z(x_0)$  であるとする、誤差平均： $m_{R0} = E[Z(x_0)^* - Z(x_0)]$  について、その不偏性より  $m_{R0}$  は 0 となり、さらに式 (3.5) および定常仮定によって  $E[Z(x_0)]$ ,  $E[Z(x_i)]$  は等しいことから、式展開によりその線形性を示す重み総和 1 が導ける。

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (3.8)$$

また式 (3.1) に対しては、前述した推定誤差分散最小化の条件を満たす必要があるため、

$$\sigma_{R0}^2 = E\left[\left(Z(x_0)^* - Z(x_0)\right)^2\right] \rightarrow \min. \quad (3.9)$$

クリギングは、推定量を求める過程において、大きく分けて 2 つの段階を経る。第一段階では、既知のデータ採取場所の距離関係とその物性値についての採取情報からセミバリオグラムを作成し、何らかの関数形に近似を行う。第二段階では、作成されたセミバリオグラムを用い、採取された情報に最適な重みを与え、未知領域 (点) における物性値を推定する。以下その過程に沿って説明を進める。



式 (3.4), (3.6) における  $\gamma(h)$  がセミバリオグラムと呼ばれるデータであり, 既知の 2 点間における物性値の分布特性を表す関数であり式(3.10)のように表される.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \{ [Z(x+h) - Z(x)]^2 \} \quad (3.10)$$

複数の計測点における計測データからこのセミバリオグラムを算出するには, 式 (3.11) のように扱える.

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N \{ Z(x_i + h) - Z(x_i) \}^2 \quad (3.11)$$

ここで,  $N(h)$  は 2 点間の距離が  $h$  となる計測点の組数である. このセミバリオグラム  $\gamma(h)$  は, 対象とする場が一般的な空間的相関関係を持つ場合には, 単純増加となり,  $Z$  の分散が  $\infty$  でなければ,  $\gamma(h)$  は距離が増すにつれ増加の割合は減少する. そして空間的相関関係を持ち得る距離が無限でないときはある距離からは, 距離が増加しても  $\gamma(h)$  の値は増加しなくなる. この距離を影響範囲 (range), そして  $\gamma(h)$  が到達する値がシル (閾値) であり, 理想的には  $Z$  の分散となる.

次に式 (3.11) から得られる計測データに基づく幾つかのセミバリオグラムの値から, その対象場におけるセミバリオグラム関数を近似的に求める必要がある. 近似するセミバリオグラムのモデルは数種類あるが, 本研究においては, 地盤工学において多用される指数型モデル式 (3.12) を採用した. なお, 地質情報の物性値には, 水平方向に関する値の変化よりも鉛直方向に関する値の変化の方が顕著なものが多く見られる際には, 水平方向と鉛直方向の 2 次元異方性を考慮する.

関数形

$$\text{指数型: } \gamma(\mathbf{d}_{ij}) = C \{ 1 - \exp(-\mathbf{h}_{ij}) \} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{d}_{ij} = (\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}, \Delta z_{ij})$$

ただし,

(異方性考慮せず)

$$\mathbf{h}_{ij} = \sqrt{\frac{\Delta x_{ij}^2 + \Delta y_{ij}^2 + \Delta z_{ij}^2}{a_1^2}} \quad (3.13)$$

(水平と鉛直の2次元異方性を考慮)

$$\mathbf{h}_{ij} = \sqrt{\frac{\Delta x_{ij}^2 + \Delta y_{ij}^2}{a_1^2} + \frac{\Delta z_{ij}^2}{a_2^2}} \quad (3.14)$$

ここに  $x, y$  は水平方向座標,  $z$  は鉛直方向座標である.

関数形のパラメータの決定法としては, 最尤法, 赤池情報指数 **AIC** を用いた手法, 非線形最小二乗法による方法があるが, 本研究の事例検証においては比較的簡単に計算によって得ることのできる最小二乗法による近似を適用した. また異方性の考慮については, 水平方向の位置データに対して深さデータを物性値として用いる地層標高や層厚のような2次元分布する物性値についての推定においては, 考慮する必要はなく, 一方, 3次元的に分布しており水平方向に比べて鉛直方向の変化が大きいと思われる粘着力, 内部摩擦角, ルジオン値などの推定には2次元異方性を考慮することが適当である. しかし, 本研究で行う後の解析においては異方性の考慮は行っていない. 実問題への適用においては考慮が必要な問題となろうが, ここでは地盤統計学の手法の内容より, これを用いたリスク定量化手法の研究である観点から, モデル化における単純化によりその目的が失われることはないと考える.

以上のようにして, 空間的相関関係を示すセミバリオグラムの関数が求まれば, 第二段階の求まった関数を用いて計測データから未知領域の物性値推定に移ることとなる. ここで, 先のクリギングにおける仮定式 (3.10) について以下のように式を書き換える.

$$E\left[\left(Z(x_0)^* - Z(x_0)\right)^2\right] = \sum_i \sum_j \lambda_i^0 \lambda_j^0 E\left[\left(Z(x_i) - Z(x_0)\right)\left(Z(x_j) - Z(x_0)\right)\right] \quad (3.15)$$

ここでセミバリオグラムの定義を考えれば,

$$\gamma(x_i - x_j) = \gamma(x_i - x_0) + \gamma(x_j - x_0) - E\left[\left(Z(x_i) - Z(x_0)\right)\left(Z(x_j) - Z(x_0)\right)\right] \quad (3.16)$$

ただし,  $\gamma(x_i - x_j)$  は2点  $x_i, x_j$  間のセミバリオグラムを表す. また式 (3.16) を用いると, 式 (3.15) は以下のように書ける.

$$E\left[\left(Z(x_0)^* - Z(x_0)\right)^2\right] = -\sum_i \sum_j \lambda_i^0 \lambda_j^0 \gamma(x_i - x_j) + 2 \sum_i \lambda_i^0 \gamma(x_i - x_0) \quad (3.17)$$

式 (3.17) が条件式 (3.8) に従い、最小化されるようにすればよい。ここでは最小化の手法としてラグランジュの未定乗数法を用いる。  $\mu$  をラグランジュの未定乗数とすると、以下のようになる。

$$Y = \frac{1}{2} E\left[\left(Z(x_0)^* - Z(x_0)\right)^2\right] - \mu \left( \sum_i \lambda_i^0 - 1 \right)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \lambda_{i0}} = 0 \quad \text{かつ} \quad \frac{\partial Y}{\partial \mu} = 0 \quad (3.18)$$

なお上式において右辺を 1/2 としているのは簡単のためである。

式 (3.18) より式(3.19)が得られる。

$$\sum_j \lambda_j^0 \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_i - x_0) \quad (i = 1, \dots, n)$$

$$\sum_i \lambda_i^0 = 1 \quad (3.19)$$

これを行列式で表すと式(3.20)が得られる。

$$\begin{pmatrix} 0 & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & 0 & \gamma_{23} & \cdots & \gamma_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \gamma_{n3} & \cdots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_0^1 \\ \lambda_0^2 \\ \vdots \\ \lambda_0^n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ \vdots \\ \gamma_{n0} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

$\gamma(x_i - x_j)$  は  $\gamma_{ij}$  で表している。また  $\gamma_{ii} = \gamma(x_i - x_i) = \gamma(0) = 0$  であるため、式 (3.20) の行列の対角線上は要素が 0 となっている。そして、この行列を解くとラグランジュの未定乗数  $\mu$  および重み  $\lambda_0^i$  が求まり、地点  $x_0$  における推定量  $Z(x_0)^*$  および推定誤差分散  $\text{Var}(Z(x_0)^* - Z(x_0))$  が求まる。なお、推定誤差分散に関しては式(3.20)から求めることが

できる.

$$\text{Var}[Z_0^* - Z_0] = \sum_i \lambda_0^i \gamma (x_i - x_0) + \mu \quad (3.21)$$

このようにして、クリギングにおいては未知の点における物性値の最適推定量が計算される。しかし、式 (3.21) に示した推定誤差分散を求める式からも分かるように、この最適推定量といっても確定値ではなく、条件から推定された最も確率の高い値であるため、最も確からしい意味の最尤推定値と称することが望ましい。

### 3.3.4 インディケータクリギングによる力学的地盤リスクの評価方法

前項では、クリギング手法を用いて地盤リスクの中で幾何学的要因をモデル化することで、特定点の物性値が定量的（確率的）に評価可能となることを示した。しかし、トンネル掘削等の地下構造物の基本設計では、ボーリングあるいは弾性波探査結果に基づき、その力学的パラメータ（指標）として岩盤分類・地山分類のような離散値が通常用いられる。このため、その離散値の不確実性を評価する場合にはクリギングのような数値データに基づく内挿による推定方法は適用できない。

仮にこれら岩盤分類が、ある数値基準値、例えば RMR（表 3.3.1 参照）や Q 値等と一対一に対応している、あるいはある範囲内に存在していることが判明しているならば、インディケータクリギングを用いることにより、目的とする箇所の物性値を直接算定するのではなく、およそどの程度の範囲の値となり得るかを推定することが可能となる。

表 3.3.1 RMR 値決定のための判断基準

パラメータ			値の範囲						
1	岩盤 基質 部の 強度	点荷重強度 指数 (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	この範囲では一軸圧縮試験が薦められる		
		一軸圧縮強度 (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	点数		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	点数		20	17	13	8	3		
3	不連続面の間隔		>2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
	点数		20	15	10	8	5		
4	不連続面の状態		極めて粗い、連続していない、開口している、面が風化していない	やや粗い、開口量<1mm、面はやや風化	やや粗い、開口量<1mm、面は極めて風化	鏡面、またはガージ厚<5mm、または開口量1-5mm	柔らかいガージ厚>5mm、または開口量>5mm		

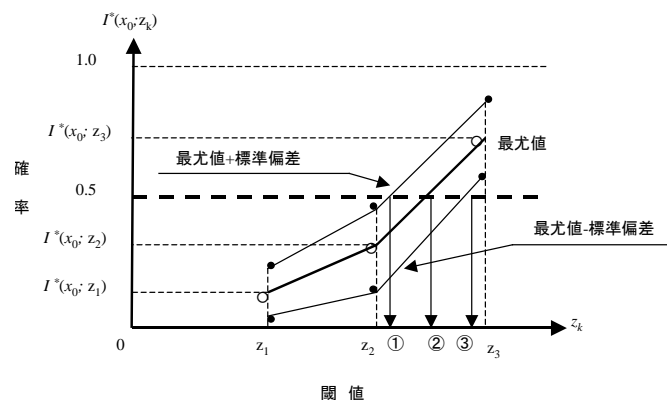


図 3.3.1 点  $x_0$  におけるインディケータ変換及び推定値の算出

	点数		30	25	20	10	0
5	地下水	ト初長 10m間の流入量 (リットル/分)	なし	<10	10-25	25-125	>125
		間隙水圧/ 主応力	0	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5
		一般的な状 態	完全に乾燥	湿り気	ぬれた状態	水	流水状態
	点数	15	10	7	4	0	

注：改訂 Bieniawski (1989) 版

インディケータクリギングは、基本的にはクリギングにおける手法と同様に推定量の不偏性と推定誤差分散最小化の条件を満たし、不偏推定量を求めるにあたって入力値に重み付けをして求めるところに特徴を有する。以下に、インディケータクリギングの定式化を示す。

サンプル位置を  $x_i$ 、推定対象量を  $z$  とした場合に、推定対象量  $z$  に関する情報として、式(3.22)に示すようにある値  $a$  以下あるいは、ある値  $b$  以上である存在範囲のみが与えられているものと仮定する。

$$z(x_i) < a \quad \text{or} \quad z(x_i) \geq b \quad (3.22)$$

このように不等式で表現される情報を活用するために、具体的には推定対象量が、事前に設定した幾つかの閾値  $z_k$  に対して、それぞれの閾値を超過しない確率（非超過確率）

を算定するものである．例えば，図 3.3.1 の模式図に示す事例は 3 種類の閾値 ( $z_k, k=1,3$ ) を設定している場合に相当する．

インディケータクリギングを用いて目的とする箇所の物性値がおおよそどの程度の範囲の値となり得るかを推定するために，対象領域内における全てのサンプル位置  $x_i$  の値に対するインディケータ変換値  $I(x_i; z_k)$  を定義する．このため式(3.23)に示すように，インディケータ変換値  $I(x_i; z_k)$  として，サンプル位置  $x_i$  の値が，ある閾値  $z_k$  を越えていると推定される場合に 0 という情報を，また閾値  $z_k$  以下と推定される場合には 1 という情報を与える．

$$I(x_i; z_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } z(x) \leq z_k \\ 0 & \text{if } z(x) > z_k \end{cases} \quad (3.23)$$

なお，インディケータ変換値  $I(x_i; z_k)$  の期待値は  $z(x)$  の累積分布関数であるとする，次式に示すように，期待値は位置に依存しなくなる．

$$\begin{aligned} E[I(x_i; z_k)] &= 1 \cdot \text{prob}[z(x_i) \leq z_k] + 0 \cdot \text{prob}[z(x_i) > z_k] \\ &= \text{prob}[z(x_i) \leq z_k] \\ &= F(z_k) \end{aligned} \quad (3.24)$$

ここで， $E[\cdot]$  は  $\cdot$  に対する期待値を表す記号であり， $F(z_k)$  は累積確率分布関数を表す．

次に，インディケータクリギングでは，任意の推定箇所  $x_0$  における物性値のある閾値  $z_k$  に対する非超過確率  $I^*(x_0; z_k)$  は，式(3.23)に示した対象領域内における全てのサンプル位置  $x_i$  の値に対するインディケータ変換値  $I(x_i; z_k)$  を用いて，以下のように表現される．

$$I^*(x_0; z_k) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(z_k) I(x_i; z_k) \quad (3.25)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i(z_k) = 1 \quad (3.26)$$

ここに  $\lambda_i(z_k)$  は，閾値を  $z_k$  に設定した際の重みである．すなわち，図 3.3.1 の模式図で述べると，任意の推定箇所  $x_0$  において，全サンプル位置  $x_i$  の値について  $z_1 \sim z_3$  なる 3 種

類の閾値を設定して得られるインディケータ変換値 $I(x_i; z_k)$ と重みを掛けた値の線形結合式により、それぞれの閾値に対する非超過確率 $I^*(x_0; z_k)$ を算定することに相当する。

なお、対象とするインディケータ変換値に対して2次のモーメントにおける定常性を仮定すると、閾値 $z_k$ に対する位置 $x$ についてのインディケータ変換値 $I(x; z_k)$ 、その位置から $h$ だけ離れた位置の値を $I(x+h; z_k)$ とすると、この2点間における変換値の空間的分布特性を表す、インディケータセミバリオグラムは以下のように定義される。

$$\gamma_{z_k}(h) = \frac{1}{2} E[I(x+h; z_k) - I(x; z_k)] \quad (3.27)$$

ここで、式(3.27)の左辺は閾値 $z_k$ に対するインディケータセミバリオグラムを表し、この値は式(3.24)に示した関係より明らかな通り、位置に依存しない。

式(3.27)に示すインディケータセミバリオグラムの関数形として、指数関数、球関数及び線形関数等の様々な関数形が提案されている。次に、式(3.25)～式(3.27)の関係式において、未知数となる重みを合理的に算定する上で、不偏性と推定誤差最小化の仮定を導入する。ここで、誤差を最小化するためにラグランジュの未定係数 $\mu$ を導入し、クリギング手法と同様な手順により変数 $\lambda_i(z_k)$ および $\mu$ と共に、非超過確率 $I^*(x_0; z_k)$ が得られる。

さらに、推定点 $x_0$ における推定誤差標準偏差 $\sigma_{z_k}$ は、 $h_{i0}$ を推定点 $x_0$ と調査により既知情報を有する点 $i(i=1, 2, \dots, n)$ の2点間の距離ベクトルとすると、式(3.28)のように表される。

$$\sigma_{z_k}^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \gamma_{z_k}(h_{i0}) + \mu \quad (3.28)$$

すなわち、RMR値の分散値が得られたことになる。このような手順をその他の閾値に対しても繰り返すことで、図 3.3.1 に示すように推定点 $x_0$ における推定値の閾値に対する確率分布を算定することができる。なお、同図では模式的に式(3.25)～式(3.27)に示す手順により算定される確率分布を最尤値に対する分布として示し、またその最尤値に式(3.28)に基づき算定される推定誤差標準偏差（以下標準偏差と称す）を考慮した確率分布も併せて示した。

### 3.4 力学的要因に起因する建設コスト変動リスクの評価方法

#### 3.4.1 力学的パラメータ

本研究では、離散的な値として与えられ、トンネルの支保パターンに関わる岩盤等級と相関がある補助的な力学パラメータとして、RMR を取り上げる。たとえば 3.5 節で後述するようにボーリングや弾性波探査による調査値と RMR、さらには支保工の選択（すなわちコストの規定）の判断材料となる岩盤分類を関連付けることにより、RMR 値をもって地盤条件を数値として表現することができる（表 3.3.1 参照）。すなわち、岩盤等級と RMR の相関に着目し、RMR を閾値として設定したインディケータクリギングにより、トンネル建設位置の各箇所における RMR の確率分布を算定する。

#### 3.4.2 地下工事のコスト変動特性

トンネルあるいは地下空洞掘削等の地下構造物の基本設計は、事前地質調査におけるボーリングあるいは弾性波探査結果に基づき、岩盤・地山の分類を行い、その分類結果に対応する吹付コンクリート・ロックボルト等の支保部材のパターンを設定するのが一般的な方法である。したがって、建設コストは、以下のように積算される。例えば、全長  $L$  の地下構造物が、 $J$  通り ( $i=1, J$ ) の地山等級に分類され、各等級に対応する長さおよび、支保パターンの 1m 当りの建設コストを、それぞれ  $L_i$  および  $C_i$  とすると、その建設コスト  $C$  は次式により表わされる。

$$C = \sum_{i=1}^J C_i \cdot L_i \quad , \text{ where } \quad L = \sum_{i=1}^J L_i \quad (3.29)$$

次に、各支保パターンに対応するコスト  $C_i$  について、以下の関係を仮定すると、

$$C_1 < C_2 < \cdots < C_{J-1} < C_J \quad (3.30)$$

建設コスト  $C$  は、最小値  $C_1 L$  と最大値  $C_J L$  の間に分布する値となることは明らかである。ただし、事前の設計段階では各支保パターン  $i$  の発生率  $p_i$  ( $L_i/L$ ) は事前の地質調査結果のみでは確定的には設定できないため、積算段階における建設コスト  $C$  は本質的には不確実な量となる。この課題に対応する方法としては、例えば Einstein の研究 [14] に代



表されるような、各支保パターン $i$ の発生率 $p_i$ をモンテカルロシミュレーションにより算定し、建設コスト $C$ を確率量として表現する手法が挙げられる。

なお、確率量を効果的に表現する方法については様々な手法が想定されるが、本研究ではリスクカーブを用いて表現する方法に注目する。ここでリスクカーブとは金融分野で用いられ、投資によって得られる収益の確率分布に対して、収益と超過確率の関係を表すものである。

リスクカーブは保険や証券などの金融分野で、リスク表現方法の1つとして考えられたものであり、小さな損害額にとどまるケースから巨額の損害に至るケースまで、様々なリスクシナリオの発生確率と損害額を算定し、これらの関係をグラフ化したものである。これは、一般にはリスク発生による損害額を横軸にとり、縦軸にはそのリスク発生確率を超過確率や年超過確率として表したものである（図3.4.1）。このリスクカーブは、対象とするリスクやその金融商品などにより、図のカーブ②、③のように様々な形状をとり、その形状からリスク性状の判断も可能となる。例えば、同図で言えば②のような形状のグラフは頻繁に比較的小さな損失が発生するが、極端に大きな損失が発生する可能性はないことを表していると言え、一方③のような形状のグラフからは、短期的には損失は少ないものの、長期的には巨大な損失を被る可能性があることが読み取れる。またリスクカーブからは損失期待値や予想損害額(PML)の発生確率を知ることができる。さらに、リスク対策によるリスク低減量を、グラフ化することで、その投資対効果を視覚的にも分かりやすく表現でき、その後の意思決定上も有効な指標として活用されうる。リスクカーブによるリスク表現は、金融の分野だけでなく、地震リスクの分析など災害リスク分析においても頻繁に活用されている（たと

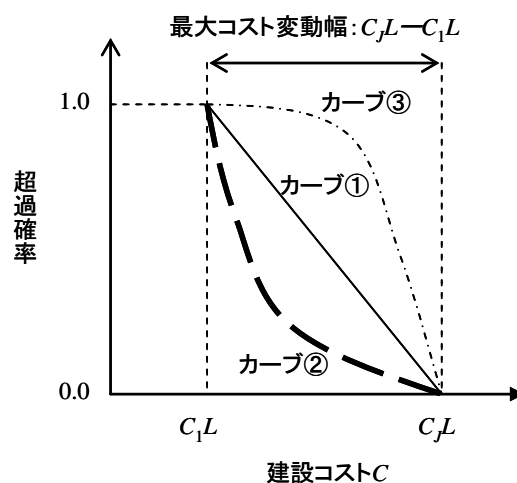


図 3.4.1 建設コスト  $C$  のリスクカーブ

えば [15])。本研究においては、リスクカーブによるリスク表現を建設コストボラティリティの表現に適用し、リスクの定量化およびリスク対応に活用できる。

一般に、金融工学では収益分布を、確率密度関数が左右対称な正規分布としてモデル化することが多く、その場合には、期待値（平均値）をリターン、標準偏差をリスクと定義されるが、収益分布が正規分布に従わない場合には、リスクカーブは、そのカーブの分布からリスク特性を評価するために用いられることが多い。また、その分布特性を評価する指標として、超過確率 $x$ を想定した場合の収益に対応する値 $(\text{VaR})_x$ （バリュエアットリスク、たとえば[16]) が用いられることもある。

式(3.29)および式(3.30)に示す建設コスト $C$ 、リスクカーブを用いて模式的に表現すると、図 3.4.1に示すような関係となるものと想定される。図 3.4.1に模式的に示した3種類のリスクカーブの意味は、それぞれ以下のように要約される。

- カーブ①： 各支保パターン $i$ の発生率 $p_i (L_i/L)$  がほぼ一定であり、その発生率の確率密度関数はほぼ一様分布に従う。
- カーブ②： 各支保パターン $i$ の発生率 $p_i (L_i/L)$  の内で、比較的軽微な支保パターン（本質的には低コストの支保パターンと等価）が卓越する場合に相当する。
- カーブ③： カーブ②とは逆に、各支保パターン $i$ の発生率 $p_i (L_i/L)$  の内で、比較的重な支保パターン（本質的には高コストの支保パターンと等価）が卓越する場合に相当する。

以上の事項に述べたように、リスクカーブを用いることで、多様な確率変動特性を効果的に表現可能となる。したがって、本研究では地下工事における地盤リスク要因に起因する建設コスト $C$ の多様な変動特性について、リスクカーブを用いて検討を加えるものとする。

### 3.4.3 インディケータクリギングによる RMR 推定と建設コスト

インディケータクリギングにより算定される RMR は確率分布であり、建設コスト変動リスクの算定には、得られた確率分布の代表値として、以下の3種類の定義に基づく RMR を用いるものとする。

#### 最尤推定値

式(3.25)より算定される関係において、図 3.3.1 に示す確率分布が正規分布のように期待値に対して対称な分布関数とならないため、期待値に準ずる値として超過確率が

50%となる値を推定箇所における最尤推定値（図 3.3.1 中②に相当）と設定する。

### 悲観的・楽観的推定値

期待値に準ずる値として超過確率 50%の値を推定箇所における最尤推定値と設定するため、最尤推定値周りのはずれを評価する量として、図 3.3.1 に示す推定誤差標準偏差 $\sigma_{zk}$ を考慮した確率分布における超過確率が 50%となる値を用いる。すなわち、式 (3.25) より算定される値に、図 3.3.1 に示す推定誤差標準偏差値（以下、標準偏差値という）を考慮した 2 種類の確率分布において、図 3.3.1 に示す確率分布超過確率が 50%となる値を、それぞれ悲観的推定値(図 3.3.1 中①に相当)、楽観的推定値(図 3.3.1 中③に相当)とする。

以上の 3 種類の定義に従って、トンネル全長に亘り算定される RMR の分布および、それに相当する岩盤等級分類・支保パターンを設定し、それぞれを最尤シナリオ、悲観シナリオおよび楽観シナリオと称する。さらに、その算定された各支保パターンに、支保部材の数量および単価を乗ずることで、最尤シナリオ、悲観シナリオおよび楽観シナリオに対する建設コストを算出することができる。

ここで、3.3.2 項に示した幾何学的要因に対して適用したクリギングでは、その手法の原理から最尤値周りの分布は対称となるため、実際に(最尤値+標準偏差)および(最尤値-標準偏差)に対して得られる、それぞれの建設コストの最尤値に対する変動量はほぼ同等である。これに対してインディケータクリギングに基づく手法では、(最尤値

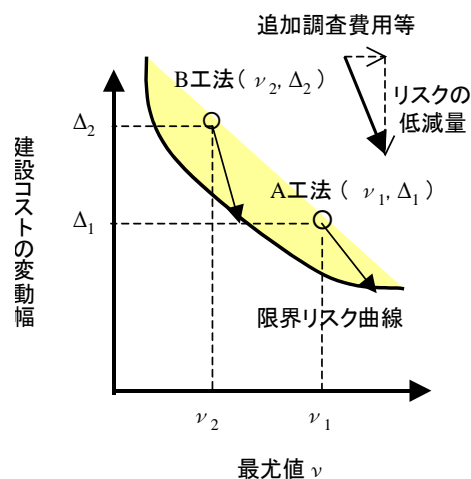


図 3.4.2 建設コストの最尤推定値と変動幅

+標準偏差)および(最尤値－標準偏差)に対して得られる、それぞれの建設コストの最尤値に対する変動量は異なるものである。

このために、本研究では図 3.4.2 に示す方法により検討を加える。すなわち、同図に示すように、横軸としては工事費に調査費を加えた事業費  $T$  の分布の最尤推定値  $v$  を採用する。

また縦軸として示す建設コスト変動の設定方法について述べる。想定される建設コスト分布が正規分布としてモデル化される場合には、期待値（この場合には最尤推定値と等価）周りの分布が左右対称であるため、期待値からのはずれの代表量として標準偏差を用いることが可能となるが、想定される建設コスト分布が正規分布としてモデル化されない場合には、最尤推定値周りのはずれ量を表す新たな指標が必要となる。このため、本研究では図 3.4.2 に示す縦軸として建設コストの変動幅  $\Delta$  を採用する。

$$\Delta = C_p - C_m \quad (3.31)$$

ここに、 $C_p$ は地質条件に関する悲観シナリオに対する建設コストおよび、 $C_m$ は地質条件に関する最尤シナリオに対する建設コストを表す。

なお、この変動リスク  $\Delta$  は、最尤シナリオ周りの推定誤差に起因するリスクであり、

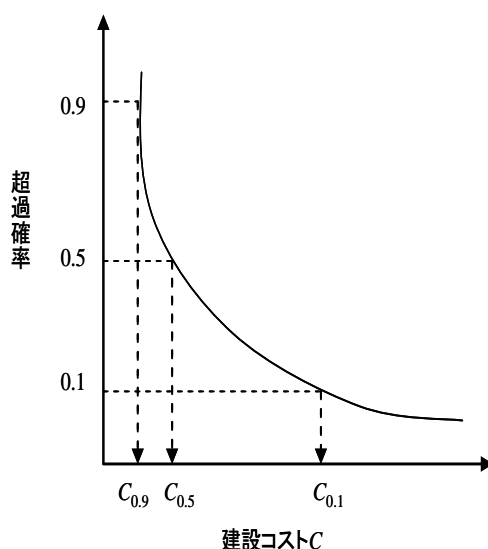


図 3.4.3 建設コストのボラティリティ算定モデル

インディケータクリギングを適用することに起因するモデル化リスクと位置付けられ

る．これに対して，本研究では，金融市場などにおけるボラティリティ評価と同時に建設コストのボラティリティを議論するためには，建設コスト変動特性を評価する方法を新たに定義する必要がある．このため，図 3.4.3 に示すインディケータクリギングにより算定される建設コストとその超過確率の関係から，以下の式(3.32)に示すように建設コストの変動リスク  $R$  を定義する．

$$R = \text{Max}[R_u, R_d] \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned} R_u &= C_{0.5} - C_{0.9} \\ R_d &= C_{0.1} - C_{0.5} \end{aligned} \quad (3.33)$$

ここに， $\text{Max}[a,b]$ は， $a$ または $b$ の大きい方の値を表わす記号である．また， $C_{0.1}$ ， $C_{0.5}$ および $C_{0.9}$ は，それぞれリスクカーブにおける超過確率が，0.1，0.5 および 0.9 に相当する建設コストを表わす．なお，式(3.32)および式(3.33)に示す $R_u$ および $R_d$ は，それぞれアップサイドリスクおよびダウンサイドリスクを表わすものである．

次にインディケータクリギングにより算定される建設コストとその超過確率の関係が，通常の正規分布と異なり非対称分布となることから，超過確率 0.5 に相当する建設コスト $C_{0.5}$ を期待値に準ずる値と仮定すると，建設コストのボラティリティ $V$ は次式(3.34)のように定義される．

$$V = R / C_{0.5} \quad (3.34)$$

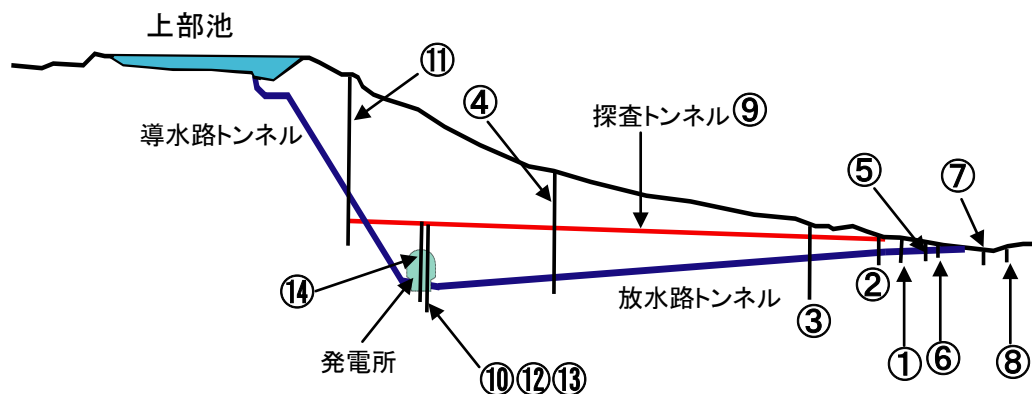
これによって簡便で統一的な方法で，ある調査に対する建設コスト見積もり値の潜在ボラティリティを表現できる．この値によっては更なる調査を行うか，投融資の判断において織り込み済みリスクとして認識した意思決定に供することができる．ただし，第6章で検討するようにボラティリティそのものをキャッシュフローモデルに適用する場合は $R_u$ ， $R_d$ の両方を反映した確率分布を使用することとなる．

以上に示した手順に基づき，次節では実際のプロジェクトを対象とした，建設コスト変動リスクおよびボラティリティについて検討を加える．

### 3.5 地下構造物を対象とした力学的要因による建設コスト変動リスクの評価結果

#### 3.5.1 解析プロセス

3.3 および 3.4 節において述べた手法について具体的な評価プロセスを検討する。第 5 章でケースプロジェクトを設定してプロジェクト全体のコストのボラティリティを検討するが、本章では地下構造物の一部を対象として評価に使用するパラメータの取扱いを中心に整理する。このような構造物には長い線形による構造物（すなわちトンネル）およびマッシブな岩塊の構造物（すなわち地下空洞）を含めることとする。図 3.5.1 に示すごとく、揚水発電所の放水路トンネルおよび発電所（地下空洞）について解析を行った [17]。



調査実施段階と調査内容

調査実施段階	調査内容
F/S	ボーリング番号①～④
D/S <sub>1</sub>	ボーリング番号⑤～⑧
D/S <sub>2</sub>	探査トンネル(番号⑨～⑩)
D/S <sub>3</sub>	ボーリング番号⑪
D/S <sub>4</sub>	ボーリング番号⑫～⑭
D/D	ボーリング番号⑮

図 3.5.1 ボーリング位置図

### 3.5.2 トンネルの推定コスト変動リスク

図 3.5.1 に示す放水路トンネルは第 5 章でケースプロジェクトとして設定する揚水式発電所建設工事のうち、放水路トンネル掘削工事（外径 8m, 内径 6.4m, 全長 1,430m）に対応しており、本項ではその建設コスト変動リスクの評価を行う。この放水路トンネルが建設される地点の地質は、第三紀の砂岩・シルト岩の互層から構成されており、断層等は存在していない。同サイトでは、フィージビリティスタディ（以下 F/S と称す）段階から詳細設計（D/D, Definite Design）に至るまでの間に、図 3.5.1 に示すボーリング孔および探査トンネルを用いた地質調査（以下、その段階ごとに D/S, Detailed Study と表記）が随時実施されている。なお、同図に示す探査トンネルは、本来地下発電所空洞の施工用連絡トンネルとして放水路トンネルに先行して掘削され、その後に点検用トンネルとして用いられているものである。

また、これらの調査結果に基づく基本設計として、支保パターンと関連付けられる岩盤分類は、表 3.5.1 に示すように砂岩およびシルト岩に対して、岩質・風化・堅さ・亀裂間隔より A1, A2, A3, B1, B2, B3 の 6 種類に分類されている。なお、同表に示すように、これらの岩盤分類は、室内実験および原位置試験の結果として、RMR、変形係数および P 波速度とそれぞれ関連付けられる。

表 3.5.1 岩盤分類と RMR の関係

岩盤分類	岩 種	RMR	変形係数 (MN/m <sup>2</sup> )	P 波速度 (km/s)
A1	砂 岩	60 以上	$9.8 \times 10^3$ 以上	3.5 以上
A2	砂 岩	50-60	約 $9.8 \times 10^3$	約 3.0
A3	砂 岩	40-50	約 $4.9 \times 10^3$	3.0 以下
B1	シルト岩	50-60	約 $9.8 \times 10^3$	3.5 以上
B2	シルト岩	40-50	約 $4.9 \times 10^3$	約 3.0
B3	シルト岩	30-50	$4.9 \times 10^3$ 以下	3.0 以下

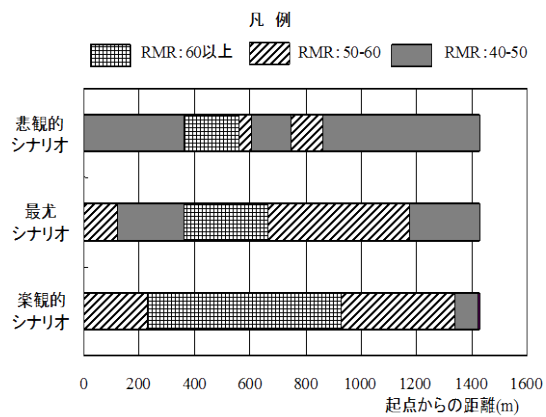
#### (1) モデル化と基本条件

図 3.5.1 に示す F/S 段階から D/D 段階までに実施された地質調査に伴う、建設コストの変動リスクを定量的に評価するための基本条件は、以下のように要約される。

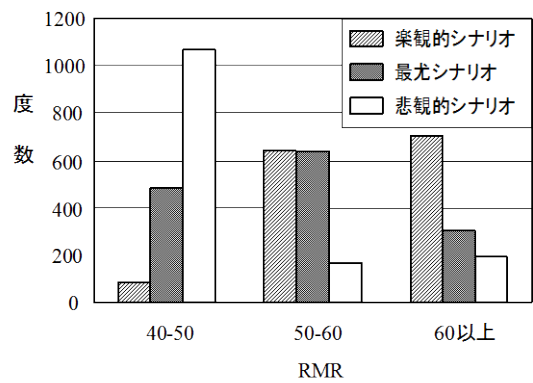
- F/S段階からD/D段階までに実施された地質調査の内容を、その実施時期に応じて、表 3.5.1 に示すようにF/S, D/S<sub>1</sub>～D/S<sub>4</sub>およびD/Dの 6 段階に分類する。
- インディケータクリギングに適用する値としてRMRを採用するが、このプロジェクト

トにおける地質調査において、D/S<sub>2</sub>段階の探査トンネルでは切羽観察結果に基づくRMRが算定されているが、その他のボーリング孔では、コア観察結果と弾性波探査結果に基づき、表 3.5.1 に示す岩盤分類の情報のみが得られている。このため、探査トンネルで得られた値に加えて、同表に示す岩盤分類とRMRの相関関係から、砂岩およびシルト岩について 40, 50, 60 を閾値としたインディケータクリギングを実施し、放水路トンネルにおける悲観、最尤および楽観の各シナリオに相当するRMRの分布を算定する。

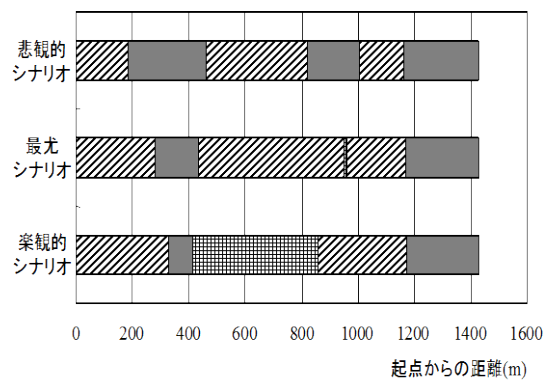




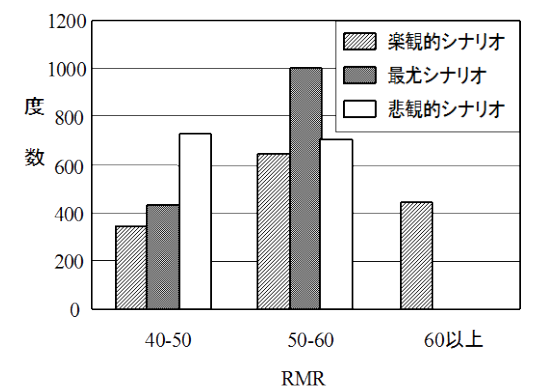
(a) F/S 段階



(a) F/S 段階



(b) D/D 段階



(b) D/D 段階

図 3.5.3 算定された RMR 値の分布の比較

図 3.5.4 算定された RMR 値のヒストグラム

なお、放水路トンネルは起点（図 3.5.1 の最深部の地下空洞との交差点）から 100m までの区間は 2 本に分岐して施工されているが、この区間は解析の便宜上 1 本のトンネルが同区間も連続していると仮定している。

## (2) 解析結果

3.4.2 項に示した条件の下で、F/S、D/S<sub>1</sub>～D/S<sub>4</sub>およびD/Dの各調査段階における地質データに基づき、放水路トンネル位置における悲観シナリオ、最尤シナリオおよび楽観シナリオの 3 種類のシナリオに相当するRMRの分布をインディケータクリギングを用いて算定する。RMRを算定する位置は放水路トンネル断面の重心位置で 1mピッチである。

各段階の調査結果を反映した RMR の算定結果のうち、代表として F/S および D/D の調査結果に基づくトンネル軸方向の RMR 分布を図 3.5.3 に示し、またそれぞれの結果のヒストグラムを図 3.5.4 に示す。両図に示すように、地質調査の量が少ない F/S 段階で算定される RMR は、その偏差（最尤と悲観・楽観の差）が大きくなるのに対して、地質調査の量が増した D/D 段階で算定される RMR のそれは小さくなる傾向を示す。

次に、各調査段階で算定されたRMRの分布に基づき、表 3.5.1 に示すRMRと岩盤等級の関係をj用い、さらに表 3.5.2 に示す岩盤分類とそれぞれに適用される支保パターンおよびそのために必要な単位面積あたりの支保パターン別工事単価を乗ずることで建設コストを算定する。その算定の結果、図 3.5.5 は、F/S、D/S<sub>1</sub>～D/S<sub>4</sub>およびD/Dの各調査段階における、最尤、悲観および楽観の 3 種類のシナリオに相当する工事費の分布をそれぞれ示す。同図に示す結果はまた、図 3.5.6 のように要約される。その内容は以下のように考察される。

表 3.5.2 支保工パターンおよび単価

岩盤分類			シルト岩			砂岩		
			B3	B2	B1	A3	A2	A1
内 訳	ロックボルト	タイプ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
		単価	322.4	137	114.2	137	114.2	
	吹き付け コンクリート	タイプ	Ⅳ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ
		単価	269	229.7	162	229.7	162	162
	スチール サポート	価格	1,305.7					
計 (USD/m <sup>2</sup> )			1,897.1	366.7	276.2	366.7	276.2	162

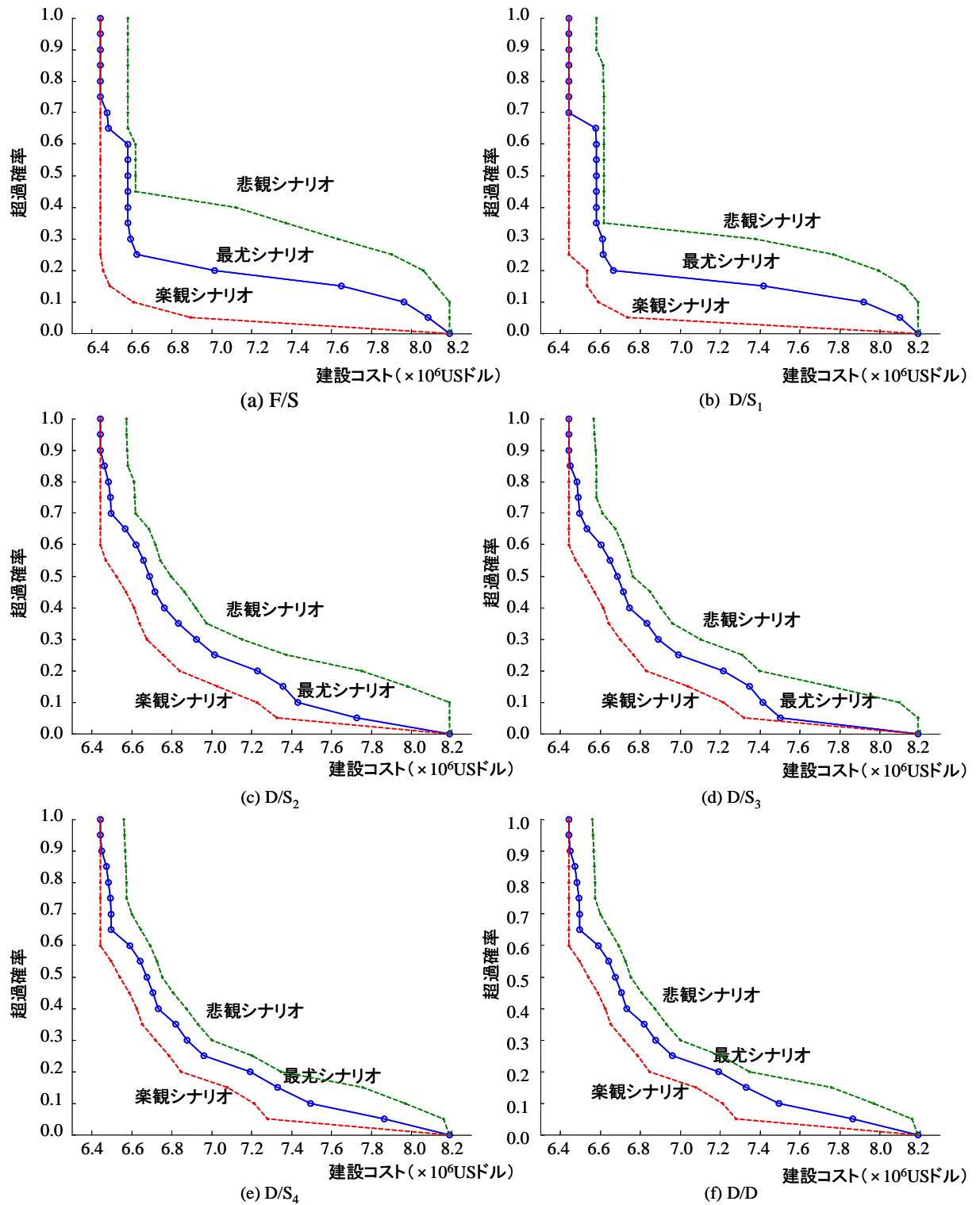


図 3.5.5 放水路トンネル建設コストのリスクカーブ

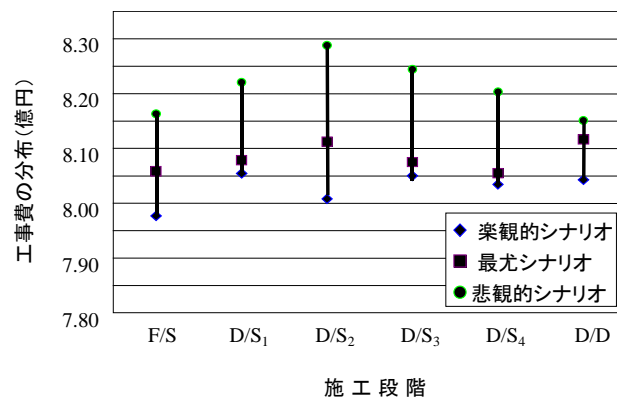


図 3.5.6 モデル推定による工事費の算定結果

(分布の非対称性)

最尤シナリオに相当する工事費は、F/S、D/S<sub>1</sub>～D/S<sub>4</sub>およびD/Dの各調査段階で多少変動するが、その変動量は、悲観シナリオと楽観シナリオに相当する工事費の差の変動量に比べて小さい。また、最尤シナリオ周りの、それぞれ悲観シナリオと楽観シナリオとの差異はいずれの調査段階においても異なっており、ここで取り扱う力学的要因に起因する建設コストの分布は 最尤値に対して対称とならないことが明らかとなる。

(調査の質と建設コストの変動リスク)

F/S～D/S<sub>1</sub>段階における、悲観シナリオと楽観シナリオに相当する工事費の差は、D/S<sub>2</sub>段階以降と比較して小さくなっている。これは、幾何学的要因による工事費の相違において述べたボーリングピッチが粗い場合と同様に、地質調査のデータ数における質が劣るため、建設コストの変動リスクを過小評価していることによるものである。

またD/S<sub>2</sub>段階における悲観シナリオと楽観シナリオに相当する工事費の差は、それ以前と比較して大きくなっている。これは、この調査段階で探査トンネルが掘削され、放水路トンネル全域における地質状況が把握されたことによるものである。

(調査と建設コストリスクの軽減)

放水路トンネル工事を対象とし、F/S、D/S<sub>1</sub>～D/S<sub>4</sub> およびD/Dの6段階のそれぞれの調査結果に基づき算定される、建設コストの楽観シナリオ・最尤シナリオ・悲観シナリオ

に対応するリスクカーブを図3.5.5に示す。同図に示すリスクカーブにより表現される放水路トンネルの建設コストの変動特性は、以下のように要約される。

- 地質調査の量が乏しい、F/S段階およびD/S<sub>1</sub> 段階におけるリスクカーブは、楽観シナリオ・最尤シナリオ・悲観シナリオのいずれの場合にも、超過確率が1.0から0.3程度までは最小値付近の値であり、その後急激に最大値に近づく分布特性となる。この結果において、リスクカーブが変動を示す超過確率が0.3以下の領域で、最尤シナリオと楽観シナリオの差、および最尤シナリオと悲観シナリオの差が共に大きく、このことは、地質調査の量が乏しいためインディケータクリギングによる推定誤差が大きいこと、すなわちモデル化リスクが大きいことを表わしている。
- D/S<sub>2</sub> 段階以後、地質調査の量が増加するに連れて、楽観シナリオ・最尤シナリオ・悲観シナリオのいずれの場合のリスクカーブとも、滑らかな分布特性を示すようになる。また、同時に最尤シナリオと楽観シナリオの差、および最尤シナリオと悲観シナリオの差が減少する傾向となることは、地質調査の量が増加するに伴いインディケータクリギングによる推定誤差が減少すること、すなわちモデル化リスクが減少することを表わしている。
- D/S<sub>2</sub>段階からD/D段階におけるリスクカーブの変化は、それ以前の段階に比べて小さい。しかし、この地質調査の量が増加する過程では、超過確率が小さい領域における悲観シナリオのリスクカーブが、より滑らかな分布特性を示すようになり、最尤シナリオと悲観シナリオの差が減少する。このことから、D/S<sub>2</sub>段階以後の地質調査の量の増加は、インディケータクリギングによるモデル化リスクを減少させることに寄与していることが明らかとなる。

次に、図3.5.5に示すリスクカーブに対して、3.4節で述べた方法に基づき、各調査段階における建設コストの期待値（図3.4.2の $C_{0.5}$  に相当）、および式 (3.29)に定義したリスク $R$ を算定した結果を図3.5.7に示す。

図3.5.7に示す関係において、楽観シナリオ、最尤シナリオおよび悲観シナリオによる期待値は、いずれもF/S段階およびD/S<sub>1</sub> 段階から、探査トンネルを掘削したD/S<sub>2</sub> 段階で増加し、その後わずかに減少する傾向となるが、各シナリオの期待値の差異は総額に比較して微小である。次に、各シナリオのリスク $R$  の内で、楽観シナリオおよび悲観

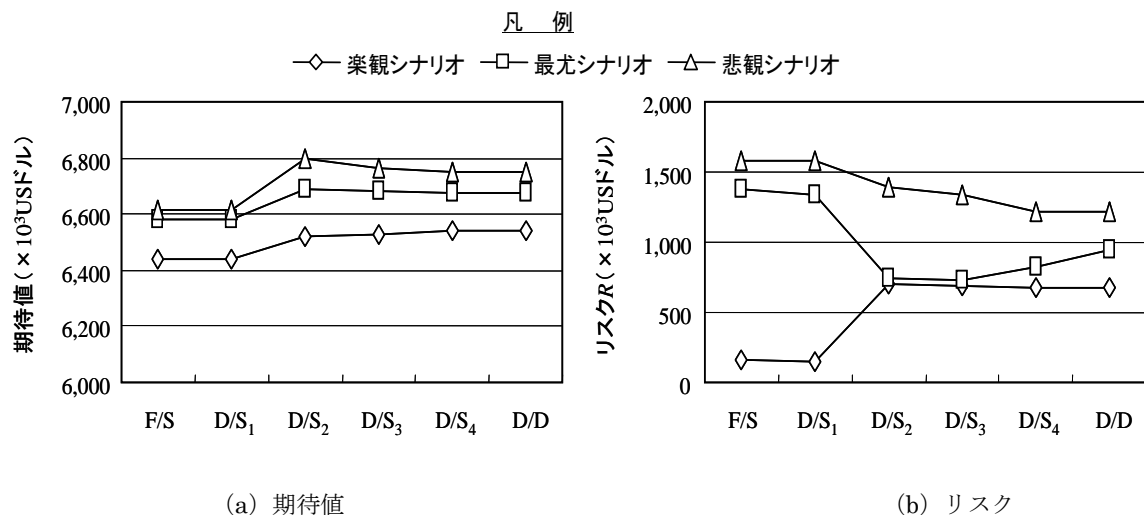


図 3.5.7 建設コストの期待値およびリスクの推移

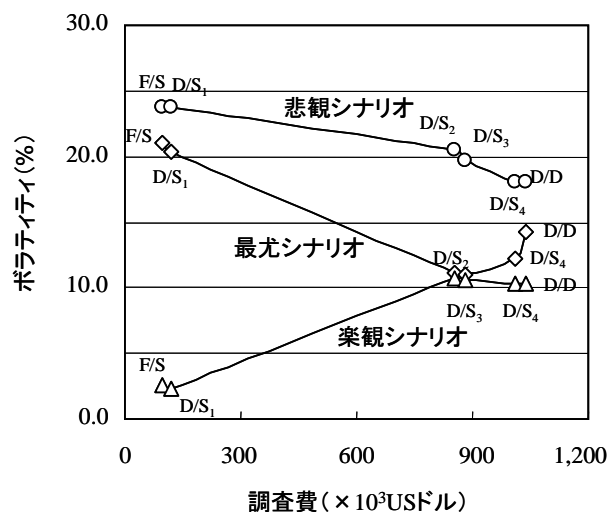


図 3.5.8 建設コストのボラティリティの推移

シナリオのリスク $R$ は、地質調査の量が増加するに連れて、それぞれ増加・減少する傾向を示す。これに対して、最尤シナリオのリスク $R$ は、 $D/S_2$  段階で最小値となり楽観シナリオとほぼ同程度の値となり、その後微増する傾向を示す。この傾向は、前述のリスクカーブの考察において述べたように、 $D/S_2$  段階におけるモデル化リスクがそれ以降の段階に比べて大きいことに起因するものであると推察される。次に、図3.5.7に示す関係を用いて、式(3.32)に示す関係に基づき、建設コストのボラティリティを算定した結果を図3.5.8に示す。同図に示すように、建設コストのボラティリティは、調査量が

増加するに連れて全般的に減少するものと解釈される。したがって、D/D終了段階で設定する建設コストのボラティリティの値は、最尤シナリオで14%程度であり、そのモデル化リスクとして $\pm 4.0\%$ 程度の幅で評価することが妥当であると推察される。

ここで、建設コストのボラティリティの値（10.0～18.0%程度）をどのように評価するかについては検討の余地があるが、市場リスクの平均変動量周りのはずれ量は、ボラティリティ $\sigma$  と時間項との積になることを考慮し、操業時に被る市場性リスクと比較して、時間に依存せず一定値となる地盤リスクに起因する地下構造物建設コストのボラティリティとを比較することは有用である。この問題については次章以降で検証することとする。

ここまでに検討してきた事例は、探査トンネルが検討対象とする放水路トンネルにほぼ平行に掘削された特異なものであり、追加調査の投資対効果が高いと判定されるであろう。本研究で提案したインディケータクリギングを用いて力学的要因に起因する建設コストの変動リスクを評価する手法によって、調査の質を高めることによる投資対効果を客観的かつ定量的に説明することが可能となる。

したがって、本研究で提案した手法は、精算を前提としないPFIに代表される調達方法により地下工事を含む建設工事を実施する場合に、その予備費の設定、資金計画の立案および、追加地質調査を実施するか否かの意思決定において、重要な情報を提供する手法になりうる。

### 3.5.3 地下発電所空洞の推定コスト変動リスク

#### (1) モデル化と基本条件

はじめにモデルの形状に関する基本条件を述べる。発電所部分の解析に際し、先の放水路トンネルについての解析同様、その形状、地質条件の取り扱い、および建設コスト計算に関して以下のような仮定を行っている。

- 発電所建設においては監査廊や排水トンネルなどの付属構造物も構築されるが、今回の解析においては発電所本体空洞部のみを対象としている。
- 発電所部側壁については数箇所複雑な形状をしている箇所があるが、構造を簡略化したモデル設定を行っている。

解析を行った発電所の形状と調査ボーリングの位置を図 3.5.9 に示す。また便宜上トンネル長手方向を  $x$  軸、それに直行する方向に  $y$  軸を取り、深さ方向下向きを  $z$  軸とし、また工事進行に伴い地質の判断と支保パターンの決定を行う単位である加背割りを図 3.5.10 に示す。

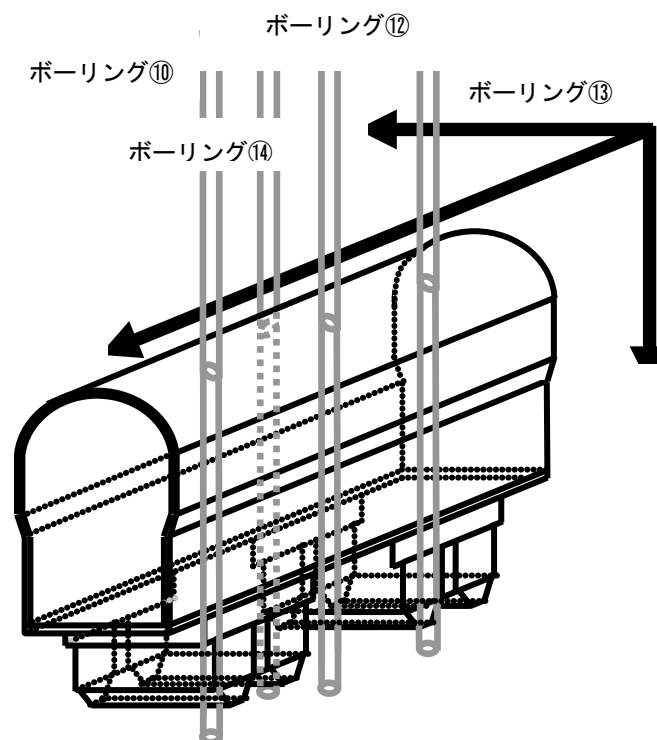


図 3.5.9 発電所モデルと関連ボーリング位置



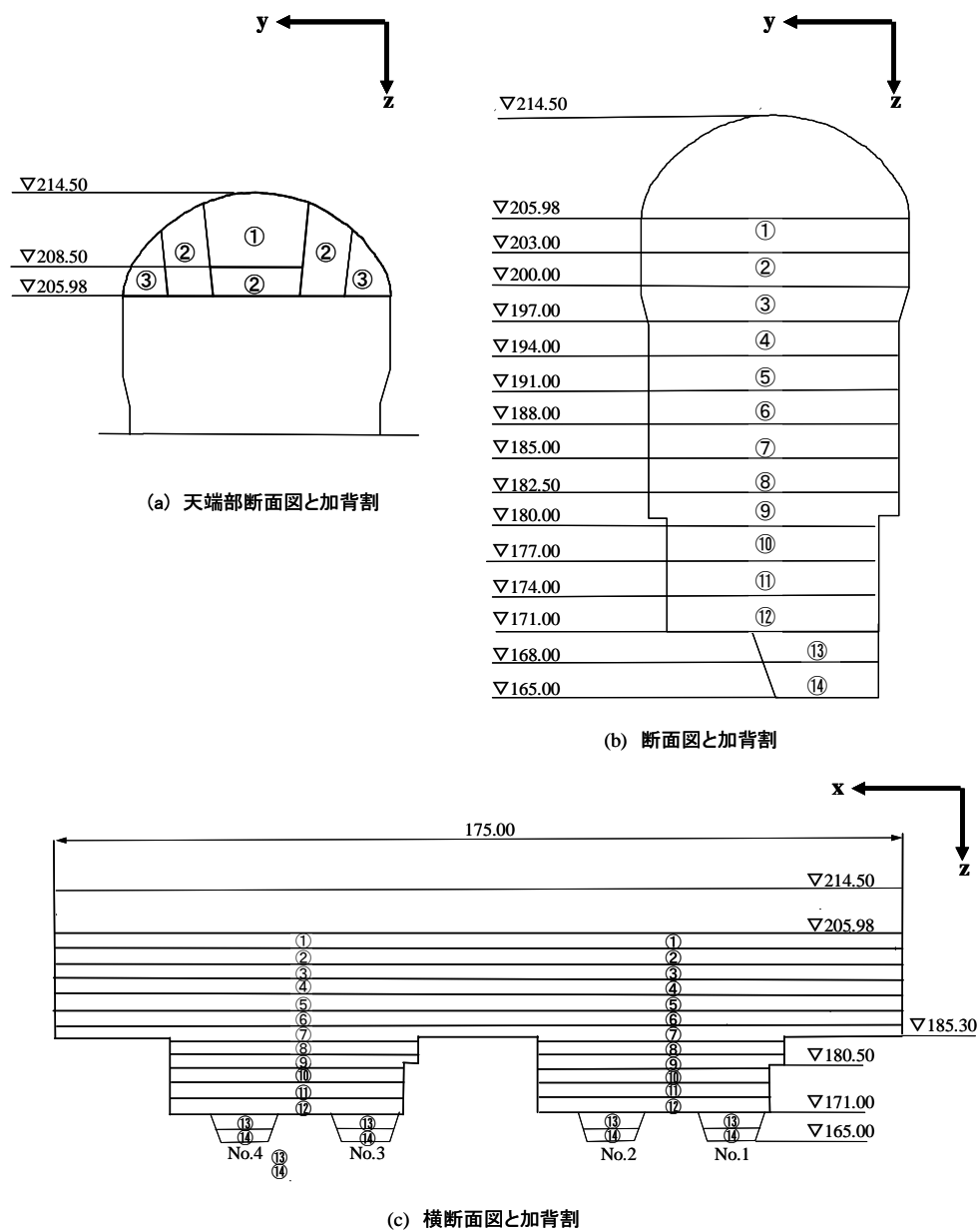


図 3.5.10 地下空洞の形状と加背割

次に，モデルに用いる地質情報に関する仮定・条件を示す．

- 推定対象とする場合は，推定物性値（RMR）に関し位置的定常にあり，また推定に用いる物性値は異方性を考慮する必要はないものと仮定する．
- 地質情報の推定に用いる調査結果は，発電所部分の建設に影響のある情報を得られている 4 本のボーリング調査によった（図 3.5.9 の⑩, ⑫, ⑬, ⑭）．

- 上記ボーリング結果から、発電所部分の推定対象エリアには表 3.5.1 に示した岩盤分類と RMR の関係において、砂岩 2 種 (A1,A2), シルト岩 2 種 (B1,B2) の計 4 種のみが存在するとする。
- 発電所空洞の地質条件の推定は、支保別精算の対象となる天端部および側壁部について行う。この際、天端部については  $x$  軸方向に 3m,  $y$  軸・ $z$  軸方向には図 3.5.10(a) に示すアーチ方向に各加背割りに対応する 5 箇所推定を行う。また側壁部は上流側・下流側共に  $x$  軸方向で 3m おきに、また  $z$  軸方向には図 3.5.10(b)(c) に示すように 14 段階に分けて推定を行う。

なお、費用推定においては、発電所部分の施工において、その支保を構成する材料は、ロックボルト、吹き付けコンクリート、PS ロックアンカーを対象とする。また、支保の方法は基本的に、アーチ部（天端）と矩形の本体部（側壁）で仕様が異なっており、このうちアーチ部については、地質・地層学的見地からすべてシルト岩層部に入ると考えられ、実際の設計においてもアーチ部における砂岩に対する支保は想定されていない。よってその事実を考慮した上で解析することとし、各岩盤分類別の支保単価は表 3.5.3 を用いている。

表 3.5.3 支保工パターンおよび単価

岩盤分類			シルト岩				砂岩	
			上部		下部			
			B2	B1	B2	B1		
内 訳	ロックボルト	タイプ	Ⅵ	Ⅱ	Ⅵ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅳ
		単価	843	532	843	532	211	211
	吹き付け コンクリート	タイプ	Ⅶ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅵ	Ⅵ	Ⅵ
		単価	1,177	614	1,177	614	614	614
	PS ロック アンカー	タイプ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ		Ⅲ
		単価	13,000	13,000	9,181	9,181		3,057
計 (USD/m <sup>2</sup> )			15.020	14.146	11.201	10.327	825	3.882

## (2) 解析結果

対象エリアにおける解析結果として得られたコストのリスクカーブを図 3.5.11 に示す。またこの背景として最尤、楽観、悲観の各シナリオについて非超過確率  $p=0.25, 0.5, 0.75$  における推定岩盤分類結果をそれぞれ図 3.5.12～図 3.5.14 に示す。これらの図から、発電所空洞においては最尤シナリオおよび悲観シナリオにおいては  $p=0.4, 0.5, 0.6$

の周辺で地質条件が急変していることがわかる。放水路トンネルと異なりシルト岩、砂岩ともに2種類の想定しか事前になされていなかったため、インディケータクリギングを用いた推定においてRMRの閾値が50ないし60という大きい値しか意味を持たず、非超過確率が0.5前後で物性値の急変する結果を得たと考えられる。楽観シナリオでは地質条件はほぼ変化しておらず、さらに同様の理由で一様性を示したと考えられる。このような背景をもとにコストのリスクカーブ（図 3.5.11）からは、楽観シナリオではほとんど変化がないが、最尤・悲観シナリオでは変化を示し得ている。

最尤シナリオに着目すると0.5以下の非超過確率で推定コストは急変する。リスクの推定範囲を狭めるためには、追加の調査ボーリングが有益であったと考えられる。

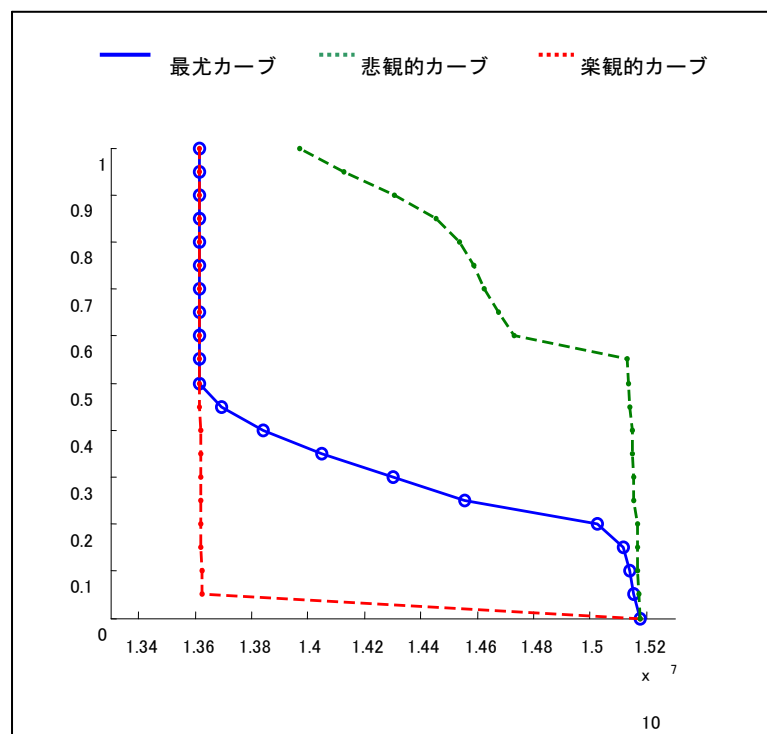


図 3.5.11 発電所空洞の建設コストリスクカーブ

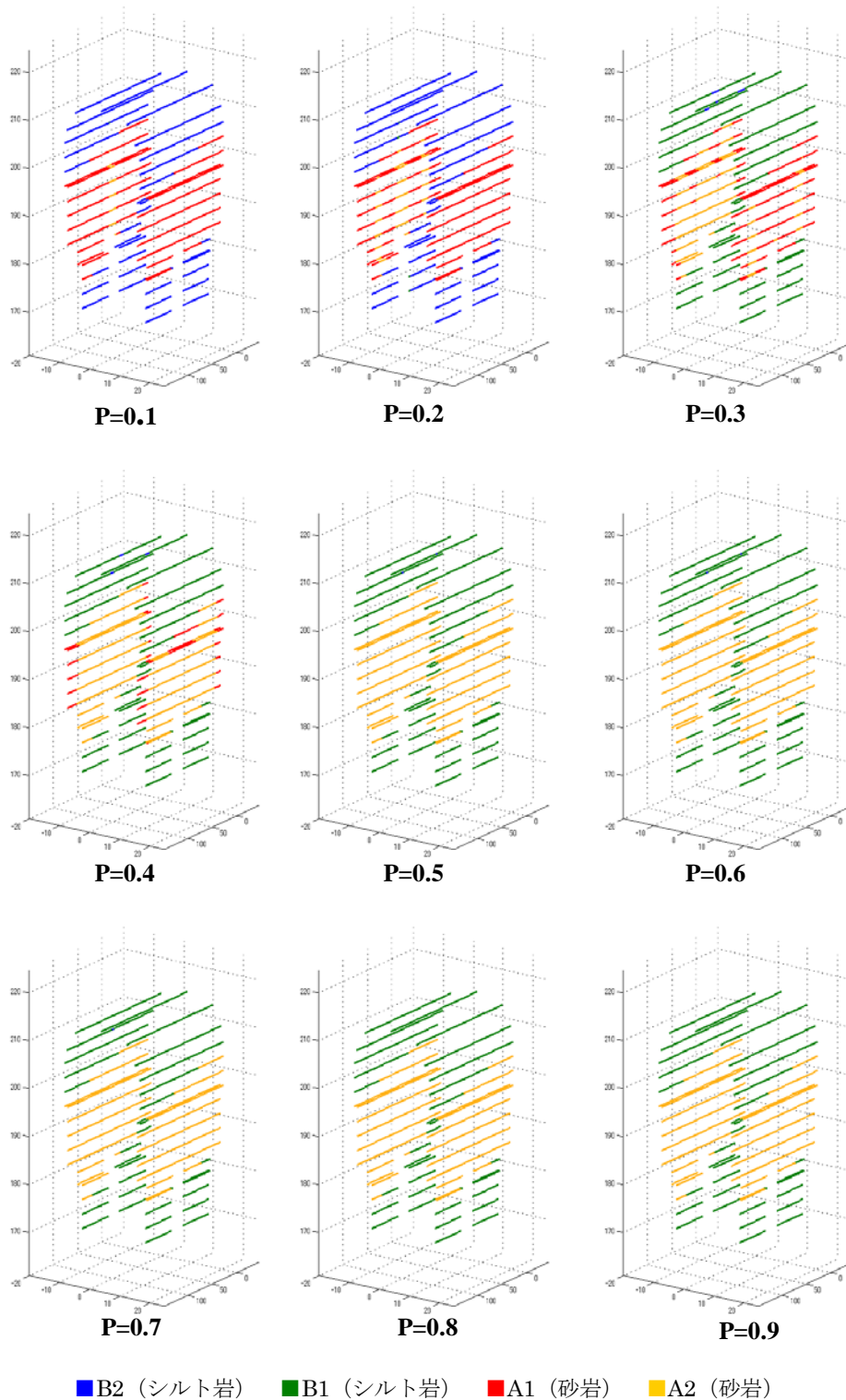
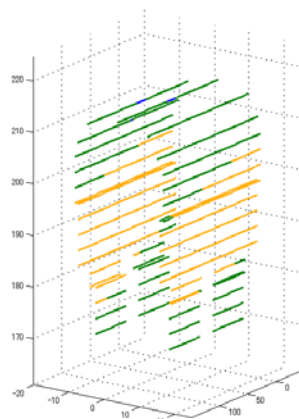
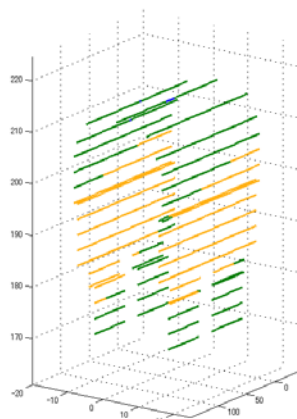


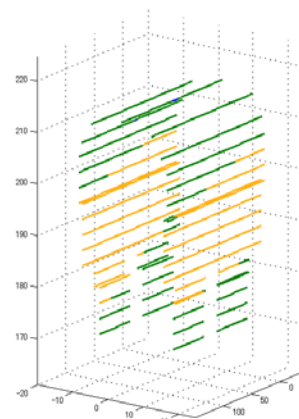
図 3.5.12 発電所における超過確率ごとの岩盤分類の違い（最尤シナリオ）



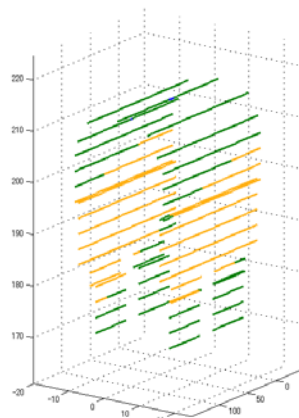
**P=0.1**



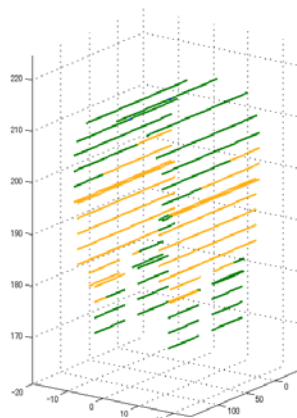
**P=0.2**



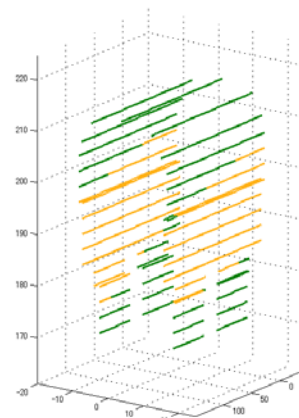
**P=0.3**



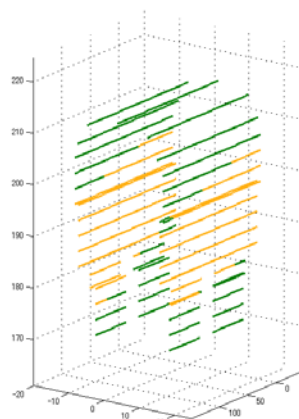
**P=0.4**



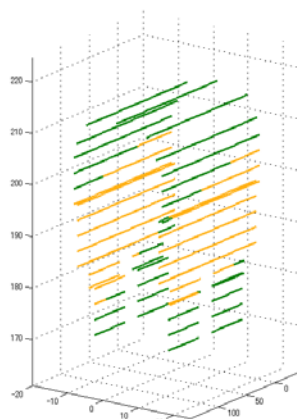
**P=0.5**



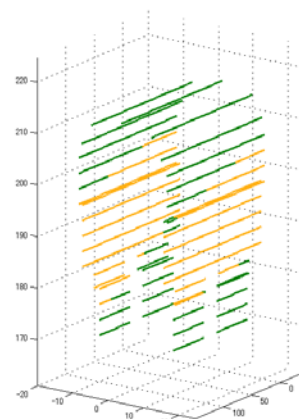
**P=0.6**



**P=0.7**



**P=0.8**



**P=0.9**

■ B2 (シルト岩) ■ B1 (シルト岩) ■ A1 (砂岩) ■ A2 (砂岩)

図 3.5.13 発電所における超過確率ごとの岩盤分類の違い（楽観的シナリオ）

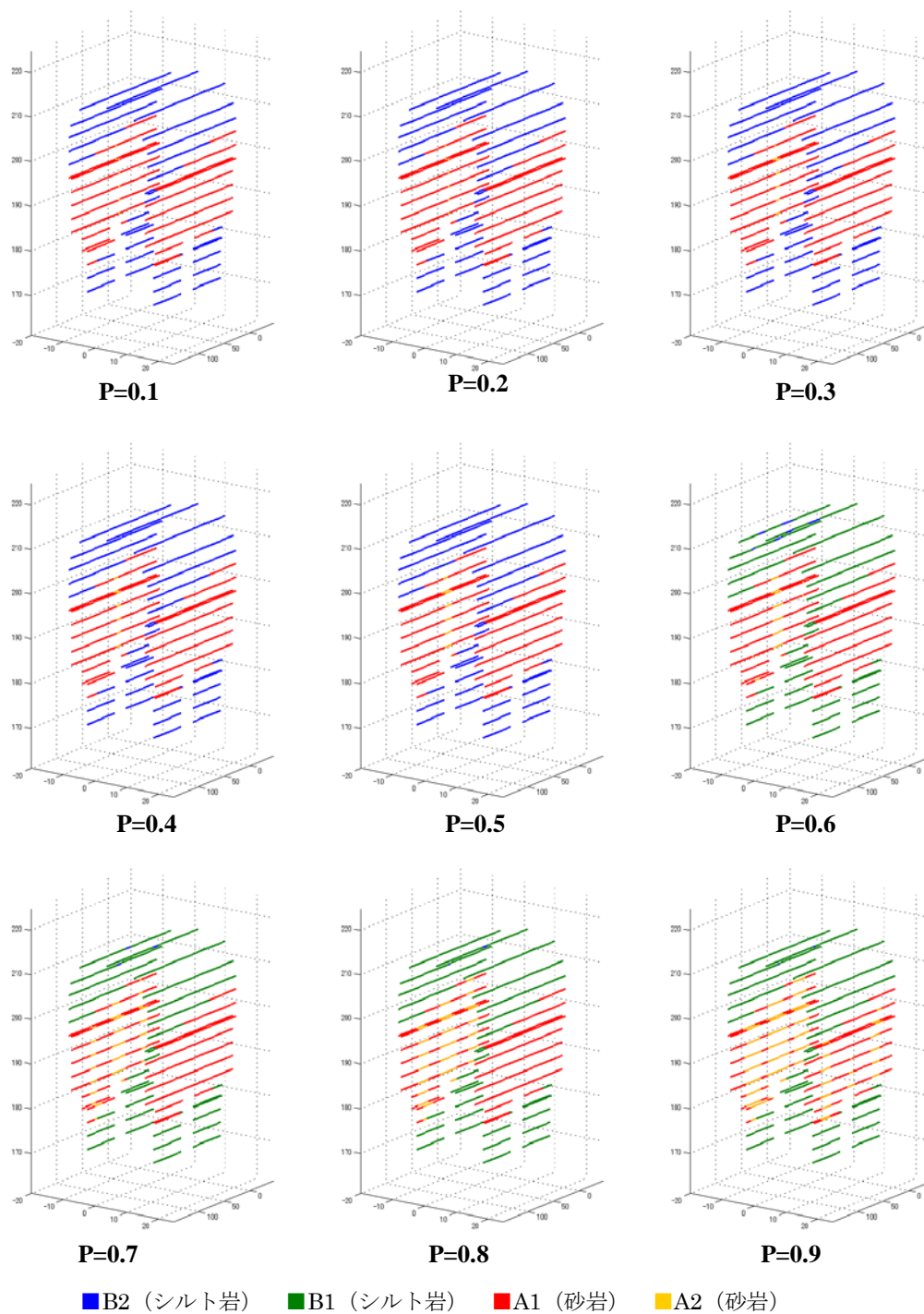


図 3.5.14 発電所部分における超過確率ごとの岩盤分類の違い（悲観的シナリオ）

#### 3.5.4 放水路トンネル・地下発電所空洞合成ボラティリティ

D/S<sub>4</sub> 段階における放水路トンネルの建設コスト変動と併せてプロジェクト全体とした場合を対象とした建設コストのリスクカーブを図 3.5.15に示す。同図に示す結果において、図 3.5.9の調査ボーリング孔の配置図に示したように、地下空洞位置に設置された調査ボーリング孔は4本だけであるので、地下空洞の建設コストの推定誤差すなわち、モデル化リスクが比較的大きくなっていることに留意する必要がある。

また、図 3.5.15に示す結果に基づき、放水路トンネルおよび地下空洞を併せた建設コストのボラティリティを算定すると、楽観シナリオ、最尤シナリオおよび悲観シナリオに対応する値は、それぞれ7.3%、12.6%および8.7%となり、放水路トンネルのボラティリティの算定結果のように、楽観シナリオ、最尤シナリオおよび悲観シナリオの順でボラティリティが小さくなる傾向とはなっていない。この理由は、図 3.5.15に示すようにモデル化リスクが大きいと、悲観シナリオに対応するボラティリティが過小評価されているためと推察される。ただし、放水路トンネルについての算定結果に示したように、地質調査の量を増やすことで、モデル化リスクが減少するため、最尤シナリオに対応するプロジェクト全体の建設コストのボラティリティも12.6%より小さくなると推察される。したがって、図 3.5.9に示した調査ボーリング孔配置から得られる情報に基づくプロジェクト全体の建設コストのボラティリティとしては、12%程度を推定値として用いることが適切である。

なお、本来、直径が異なり現場条件も異なるトンネルのボラティリティが同じである

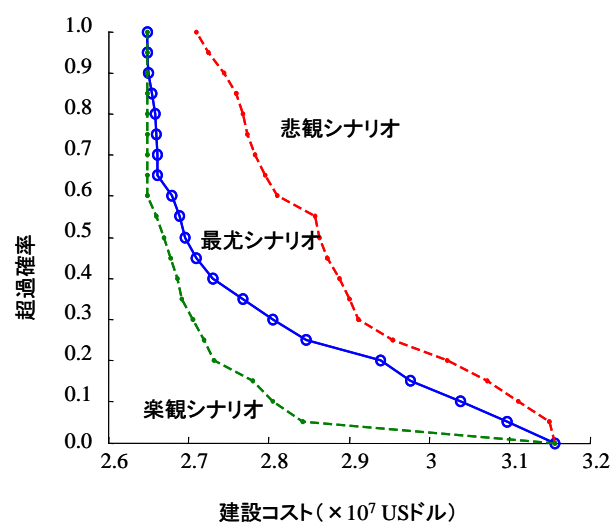


図 3.5.15 地下空洞を含む建設コストのリスクカーブ

ことはありえないが、検討作業の関係上精密な測定が行えなかった水圧管路工事が有する工事費ボラティリティは平均的には図 3.5.14に包含されるものとして今後の検討を進める。

### 3.6 結 語

本研究では、PFIスキームで建設するプロジェクトの総合的な事業リスク評価を行うため、操業段階で想定される長期市場リスクおよび需要変動リスク等と同等に、トンネルおよび地下空洞を構築する地下工事を対象とし、地盤リスクに起因する建設コスト変動特性を総合的に評価する手法を提案した。具体的には、地盤統計学を用いたリスク評価手法に加えて、新たに金融工学の分野で用いられるリスクカーブの概念を用い、地盤条件に起因する建設コストのボラティリティを評価する手法を示し、実際の建設プロジェクトを対象としたボラティリティの算定結果をも示した。この結果として得られた知見は、以下のように要約される。

- ① 地盤リスク要因に起因する建設コスト変動リスクは、インディケータクリギングを用いて評価することで、コスト変動リスクとモデル化リスクの2種類のリスクを含むこととなる。
- ② コスト変動リスクとモデル化リスク共に、調査量が増加するに連れて全般的に減少するものと解釈される。ただし、調査量の水準が低い場合、調査量の増加に対して必ずしもリスクが減少するとは限らない場合がある。
- ③ 本研究に示す手法は、操業リスク（長期市場リスクおよび需要変動リスク等）と同様に、トンネルおよび地下空洞を構築する地下工事を対象とし、地盤リスク要因に起因する建設コスト変動特性を総合的に評価することが可能となる。

本研究では、地盤リスクに起因する建設コスト変動特性の定量化を実施したが、第5章以降でケースプロジェクトを対象とし、操業中の各種リスクを評価することで、総合的な事業リスク評価を検討していく。



## 参考文献

- [1] ツヴィ・ボディ, ロバート・C・マートン, 大前恵一朗訳: 現代ファイナンス論 {意思決定のための理論と実践}, pp.324, ピアソン・エデュケーション, 2001.
- [2] 田中誠: 不均質地盤モデルの作成法とその浸透流解析への応用に関する研究, 京都大学大学院学位論文, 1999.
- [3] 大津宏康, 尾ノ井芳樹, 大本俊彦, 大西有三, 西山哲, 黄瀬周作: PFI 建設プロジェクトでの地下リスク評価及び分担に関する研究, 土木学会論文集 No.721/VF-57, pp.193-205, 2002.
- [4] FIDIC: Conditions of Contract for Construction Building and Engineering Works Designed by the Employer, First Edition, 1999.
- [5] 野口悠紀雄: 金融工学, こんなに面白い, 文春新書, 2000.
- [6] 大津宏康, 尾ノ井芳樹, 大西有三, 高橋 徹, 坪倉辰雄: 力学的地盤リスク要因による建設コスト変動の評価に関する研究, 土木学会論文集 No.756/VF-62, pp.117-129, 2004.
- [7] 大津宏康, 尾ノ井芳樹, 大西有三, 高橋 徹, 坪倉辰雄: 力学的地盤リスク要因による建設コスト変動の評価に関する研究, 土木学会論文集 No.756/VF-62, pp.117-129, 2004.
- [8] Tauran, A. : Probabilistic Model for Cost Contingency, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, May/June, pp.280, 2003.
- [9] Matheron, G. : Principles of Geostatistics, Economics of Geology, 58, pp.325-341, 1963.
- [10] 間瀬茂, 武田純: 空間データモデリングー空間統計学の応用, pp.135, 共立出版, 2001.
- [11] Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F. : Support of Underground Excavation in Hard Rock, A.A. Balkema, 1995.
- [12] Olea, R.A. : Geostatistics for Engineers and Earth Scientists, Kluwer Academic Publisher, 1999.
- [13] 田近久和: 地盤統計学に基づく不均質な岩盤の透水特性推定に関する研究, 京都大学修士論文, 1998.
- [14] Einstein, H. H.: Risk and Risk Analysis in Rock Engineering, Tunneling and Underground Technology, Vol. 11, No.2, pp.141-151, 1996.
- [15] 中嶋秀嗣: 講座・リスク工学と地盤工学「4. リスクマネジメント」, 土と基礎, 52-5, pp.33-40, 2004.
- [16] Crouhy M., Galai D. and Mark R. : Risk Management (リスクマネジメント), 三浦良造他訳, pp.157, 共立出版, 2004.

- [17]足立純：地下構造物建設プロジェクトにおける地盤条件の不確実性に起因したコスト変動の定量化に関する研究，京都大学大学院工学研究科修士論文，2004.

## 第4章 事業リスク評価手法に関する研究

### 4.1 緒言

地盤リスクがプロジェクトの成否にどのように影響するかの帰結を見通すためには、そのプロジェクトを通じた事業がどのように構築・運営されるかという問題の全体をとらえる必要がある。民間事業としてプロジェクト実施の決定が行われる瞬間は投資家による出資と銀行による融資が決断されたときに他ならない。従って本章では事業全体のリスクを評価する方法について明らかにし、そこに地盤リスクがどのようにかかわるかを検討する。なお本章の内容は上記の観点で展開されるため、記述の多くは経営学や商学の領域に属する内容が多いことを始めに述べておきたい。

プロジェクトをとりまくリスクは多種多様である。それらのリスクは自然科学の知識で表現されるべきもの、また経済学や商学など社会科学の知識で表現されるべきものが含まれる。しかし近年、社会科学的に捉えられる「リスク」においても、金融工学の発達によってその計量化が著しく発達し、民間企業の経営もこれらにもとづいて計数管理による合理性を求めようとする傾向にある（たとえば [1]）。

民間企業の象徴として株式会社を考えると、株式会社法に基づく「会社」は、個人ではとりきれないリスクをとって事業を行うために設立されるものとされている[2]。事業が最終的には企業の利益追求のためであるとすれば、その評価は金銭で計測されなければならない。第2章で述べた通り、これまでの事業評価においてはプロジェクトコストのうち不確実な部分は予備費として最尤の見積もり額に定率で加えてリスクの顕在に備える方法が一般的であった。しかし、プロジェクトがもつ市場リスク、信用リスク、天候リスク、種々の偶発リスク（保険によりカバーされるもの）、などは表 4.1 に示されるように、整備された金融システムや金融商品によって、相当程度においてそのボラティリティの評価を経てデリバティブなどによって変動価格を固定価格に転換するサービスが実施されている。住宅ローンにおいて変動金利と固定金利が選択できるようなサービスが身近な事例である。

本章ではこのように企業経営の立場から見た事業リスクについて分析を行う。その準備としてファイナンスの分野が対象とする金融資産にかかるリスクのフレームワーク

を整理し、次に事業リスク評価の諸問題について論ずる。

その前提として金融資産と事業資産について議論を整理する。金融資産は証券、債券など金融市場で取引されたり個別の相対（あいたい）契約で保有される額面が記された資産であり、事業資産とは発電所や工場など事業活動によって利益を生む資産であって、事業活動を目的とした子会社の株式などもこれに相当する。金融工学が取り扱うのは主に前者であるが、事業資産にも含まれる金融的リスクの評価について有用であることはいうまでもない。第5章において地盤リスクを有する土木施設の資産リスクを事業全体のリスク評価に取り込んだモデルを議論する前に、事業リスクの総体を整理し、計量的な把握ができるもの、できないものに関して、それぞれの対処について本章で考察する。

## 4.2 金融資産リスクと事業資産リスク

### 4.2.1 資産の概念

資産と称する用語は使う立場によってかなり幅広くとらえられている。企業会計において現金、売掛金、有価証券、受取手形、商品、建物、土地、備品など経済的資源をいう。これらは、貸借対照表の左側に表記される「資産の部」の項目として記載され、企業に将来効用をもたらす、それぞれの資産の将来価値がボラティリティを有する。金融資産は種々の通貨による現金、保有する他の会社の株式、債券など有価証券などであり、銀行や保険会社などは多数のこのような資産を有しているため、このような金融資産の組み合わせ、すなわちポートフォリオの最適化を図る行為をアセットマネジメントと称している。

一方、事業資産は、たとえば電力会社の発電設備など、物理的存在を通じて企業に効用をもたらす資産であり、製造業などの工場資産などが顕著な例である。本研究では資産なる用語は企業会計上の概念で使用している。

### 4.2.2 資産の種類によるリスク計量の実態

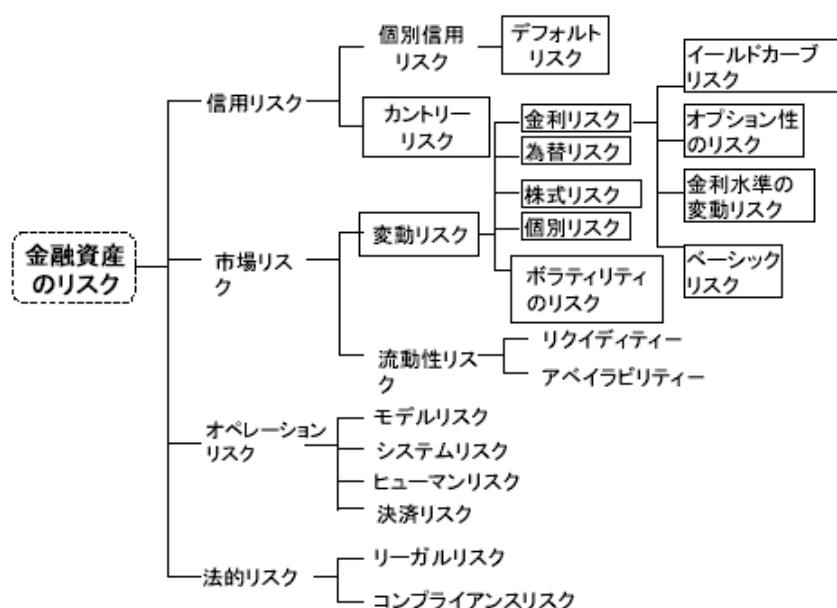
高度に発達した国際金融市場で取引される、証券、債券、為替などの金融商品や、原油、天然ガス、石炭などエネルギー分野や大豆・小麦など農業分野の一次製品の市場取引においては、その価格が一定のルールに基づき計測され、十分に長い期間のデータが蓄積されている。これらのデータはヒストリカルデータとして公開され、あらゆる分析者は共通のデータに基づいて分析を行うことができる。特に金融のデータは市場参

加者が多く、一部の産油国や石油メジャーが支配する市場と異なり相対的に良く裁定が行き届いた結果を表しているデータと理解することができる。このことから金融資産リスクにおいてその計量的分析が先進的に進んできたと言えよう。

一方、事業会社の所有する事業資産については、多種、特殊、計測困難などの理由により、計量的なリスク分析は限界があると理解される。本研究の立場として、まず金融資産リスク計量の実態を整理し、次に事業資産リスク項目を整理したうえでその計量に関する課題を明らかにする。しかる後に BOT 事業のリスクミティゲーションと民間の投融資評価についてこれまでの方法の限界と新たな手法の提案に議論を展開する。

#### 4.2.3 金融資産リスク

金融資産リスクは銀行、生命保険、各種年金団体など、その運用を通じて利益を上げる機関において特に重要である。図 4.2.1 において山下はその内訳を信用リスク、市場リスク、オペレーションリスク、法的リスクに分類し、BIS基準<sup>1</sup>によって計量化対象



注：□で囲まれた項目は BIS 基準で計量化の対象となるリスク。  
本図は文献 [3] の図をもとに一部改変したものである。

図 4.2.1 リスクの分類図

<sup>1</sup> 銀行の財務計画モデルにおける制約条件のうち自己資本比率に関して国際的な取り決めを行ったもので法律上の規制である。

となっている項目を示している[3]. 信用リスクについては、取引相手や外国の国債などにおいて債務者が履行能力を失うリスクであり、このリスクの事前把握のために Moody's社やS&P社<sup>2</sup>などが、国や企業の債券等に格付けを行っている. 市場リスクについては、資産価格の変動がリスクであり、このリスクについてはその不確実性について研究が進められ金融工学として体系化されてきたことはこれまでに述べた. オペレーションリスク、法的リスクについては金融機関内部に関するリスクであり、リスクマネジメントについて企業会計と関連付けて近年多くの研究がなされている（たとえば[4]）. これら、金融機関の国際的なリスクマネジメントの体系のひとつとしてALM (Asset and Liability Management) があげられる. これは総合的資産・負債管理手法であり図 4.2.2 のバランスシートに示すように、資産(Asset)と負債(Liability)とをそれぞれ別個にではなく、双方のバランスをとりつつ最適な組み合わせを求める、ないし運用するという意味でこのような用語が使用されている. つまり、

①一定リスク水準のもとで収益最大の方策、また

②一定の集積水準のもとでリスク最小の方策

にかかる経営の意思決定プロセスを指している. 言い換えると「経済・金融環境の予測を踏まえたうえで、適正な流動性を保持し、かつ収益すなわち利回りとコストとの差額の最大化、平準化を志向して、資産と負債との最適組み合わせを決定し管理すること」と説明される[5]. この前提としてアセットもライアビリティもすべてそのリスク（ボラティリティ）が計量されることが必要である. ある銀行に本研究が対象とする地盤リスクを包含したプロジェクトにローンを求められたとして、その銀行資産<sup>3</sup> (Asset  $i$ ) にかかる債権回収リスクが計量されていないと考えると、そのようなローン債権を銀行の資産ポートフォリオに加えることが困難とする考え方が理解される.

資産 (債権)    資本 (債務)

Asset 1	Liability 1
Asset 2	Liability 2
⋮	⋮
⋮	Liability $k$
⋮	⋮
Asset $i$	Liability $n$
⋮	
Asset $m$	Equity

図 4.2.2 金融機関バランスシートにおけるアセットとライアビリティ

<sup>2</sup> 市場で流通している社債や国債など各種債券への投資適格性を分析し、債券の格付けという形で公表している会社数社のうちの代表的会社 2 社.

<sup>3</sup> プロジェクトに融資する銀行にとってはローンが資産である.

プロジェクトへの債権を保有する銀行の視点、すなわち今日の金融機関の経営の要諦は、プロジェクト開発を行う者にとっても重要であり関心を持つべき事項と言える。

事業資産価値に影響を与える市場価格変動リスクの代表的な例は、金利変動リスク、為替変動リスク、株式変動リスク、コモディティ<sup>4</sup>価格変動リスクなどが挙げられる。このうち金利、為替のほか、石油燃料など市場で取引されるコモディティは事業資産運用のキャッシュフローを左右する。ただし、これらの資産は経済活動を通して相互に影響しあう。特に金利と為替は政府の経済政策の重要なツールでもあり、また相互に作用する因子である。通常、開発途上国において巨大な資本投資を必要とする発電事業のような場合は、ホスト国が外資に頼らざるを得ない事情なども考慮して、買電料金の一部をハードカレンシー<sup>5</sup>で支払うことにより、投資家やレンダー（銀行）に為替リスクを負わせないことを外資導入インセンティブとしている場合がある。資本投資のうち多くの部分がタービンや発電機など先進国の製品を使用し、その支払い通貨がハードカレンシーであることが背景となっている。本研究において事業リスクを論ずる立場からは、為替リスク負担のあり方について検証する必要があるが、前述のような現実と検証すべき相互に関係のあるリスクファクターの錯綜を避ける意味から、水力発電事業資産にかかる市場リスクの推定問題としては金利変動に着目した分析を行う。この点については第6章で論じる。

#### 4.2.4 事業資産リスク

一方、事業資産特有のリスクについて考察しておかなければならない。著者がこれまでに従事した BOT 案件で議論されたリスク、またプロジェクトファイナンスの現場で取り沙汰される各種リスクを、これまでに公に報じられたプロジェクトファイナンスに関する知見（たとえば [6]）から整理し、計画から事業終了まで時系列的に表 4.2.1 に取りまとめた。以下にその概要を述べる。

同表に示す開発リスクは事業会社(SPC)にとってのリスクではなく、事業を開始するかどうかに関するスポンサー（出資者）のリスクである。この開発期間の調査が後の建設リスクを把握するための重要な情報をもたらす。この点については、第3章で地盤リスクに対する事前地盤調査の問題として取り上げている。この段階のリスクはスポンサーがその事業環境で速やかに開発できるかどうか、大きな困難はないか、などの目利き能力が開発リスクを減ずることができる。スポンサーのその部門における玄人として事業を見通す判断力が、開発準備に入ったものの投融資決定ができず準備段階が状態が長

<sup>4</sup> 市場で取引される商品先物。

<sup>5</sup> 米ドルなど国際的に流通している通貨と自由に交換できる通貨。

く続くリスク、つまり開発リスクを回避する最も有効な手段となる。この目利きには建設工事に潜むリスクについてのスポンサーの見積もり能力も含まれる。

建設時においてはプロジェクトファイナンスによるスキーム下では建設契約として EPC ターンキー契約が特徴的である。この契約形式においては建設リスクを回避するための設計および建設マネジメントをほぼ全面的にコントラクターに委ね、スポンサーや銀行からみて、建設費の事前確定性を高めている。コントラクターに委ねる背景には、スポンサーあるいは SPC 側には建設工事をうまく発注はできるがマネジする能力が無い、ないしは有っても設計や建設マネジメントに関してコントラクターの能力に劣後することが前提となっている。このことは民間事業である以上は一般化し得る。つまり事業会社（ここでは発電事業）はその操業から利益を得るのであって、建設のチャンスは自社の新設工事だけではコントラクターのそれを上回ることが一般的に困難だからである。従って工事経験の豊富なコントラクターがその設計や建設マネジメントに長けていると一般化できる。日本の公共事業や電力会社が発注する土木工事においては、発注者側が設計をつかさどり、かつ施工管理の段階でも発注側が技術的な判断を多く行ってきたが、発注者が自ら経験する工事数を十分確保できない場合は、その技術力は工事をいつも行っていることを生業とするコントラクターに比べ相対的に低下すると言わざるをえない。このようなケースは特に民間の事業会社で起きやすく、ましてや PFI による民活事業でも同じことが言える。また表 4.2.1 にある LD 上限による欠け目とは、仮に EPC ターンキー契約においてコントラクターの瑕疵担保責任に上限（たとえば契約金額の 10% など）がある場合、仮にコントラクターの設計瑕疵などにより修復の効かない手戻り工事などがあっても損害補償が上限以上にはならないことを意味し、EPC ターンキー契約といっても内容次第では工事オーナー側のリスク対策になるとは一義的には言えない。

操業時においては、政府による制度変更などのカントリーリスク、販売価格・数量、燃料価格・数量などの市場リスクの他、天候による事業への影響などの自然リスク、販売先（オフテーカー）の倒産などの信用リスク、また事業終了時に資産価値を見込んでいる場合、その実現リスクなどがある。また、経営者のコンプライアンス意識の欠如からくるガバナンスも広い意味でリスクと認識される。

さらに、建設時、操業時の共通のリスクとして、海外で行う BOT 事業の特徴として、特に開発途上国特有のカントリーリスクや、天災・不可抗力が挙げられる。前者については 4.3.3 項において事業スキームによるリスク回避策とともに述べる。後者は歴史的にかつ世界的に損害保険が役割を果たしてきたが、たとえば地震保険などのように本来



「大数の法則」が成立しなければならないところ、多くの加入者が一箇所に集中する場合に集積リスクが大きな問題になるなど、天災と保険をめぐる論点は十分に注意すべきであるが、本研究ではこの問題については体系化された研究に委ねることとする（たとえば[7]）。

このように事業リスクには金融資産のリスクよりも、制度リスクなどの定性的リスク、建設リスク、天候リスク、燃料などの市場リスク、等が含まれ複雑といえる。また、この事業を行う SPC の証券、貸付債権は流動性が小さく、それを取り扱うマーケットは一般に存在しない。従って、プロジェクトごとのリスク分析と回避策は入念に検討されなければならない。しかしながら本研究で扱う建設リスク、とりわけ地盤リスクや、これまでに金融工学の成果によって計量化を試みることができる燃料価格、金利、および為替などの市場価格のボラティリティ評価など、数学的アプローチが可能であるリスクについて表 4.2.2 に示す。さらに、たとえば風力発電所や揚水式ではない通常の水力発電所で発電量を支配する風況や河川の流況のように周期性が認められる値については、従来の確率統計学の知識を用いて観測結果にもとづいた評価を行うことができる。

本研究では、実際的なプロジェクトファイナンスによる事業スキームにおいて、数学的にモデル化が難しくリスク分担構造によって回避されるリスクと、計量化の可能性があるにもかかわらず従来行われてこなかったリスクと、両方の定性的リスクに説明を加え、SPC の事業経営に影響を及ぼす変動性のあるリスクを整理する。

表 4.2.1 プロジェクトリスクの分担者および対策

主なリスク項目	リスク分担者	リスク特性	対 策
開発段階			
開発権・事業権取得	スポンサー	開発過程の不首尾はスポンサーの当該事業に対する総合的な目利きスキルのリスク。	当該政府との良好関係・理解
土地取得(住民移転含む)	スポンサー、ホスト国政府		住民対話、十分な補償
各種許認可	スポンサー、ホスト国政府		行政制度の整備・理解
調査・アドバイザー・入札コスト	スポンサー		十分なリスクへの準備
反対運動	スポンサー、ホスト国政府		説明、対話、十分な期間
事業性不首尾	スポンサー		スポンサーの事業戦略
資本調達不首尾	スポンサー、ホスト国政府		ベンダーの事業評価を事前予測
建設段階			
パートナー(共同スポンサー)信用リスク	スポンサー、ベンダー	企業信用力、出資金未達	事前に格付け、財務内容確認
労務・資材調達	EPC コントラクター	労働・資材の市場リスク	EPC ターンキー契約
各種建設許可(工事関連)	EPC コントラクター	地元行政の理解	EPC ターンキー契約
EPC コントラクター信用リスク	スポンサー、ベンダー	EPC コントラクター債務放棄	事前に格付け、財務内容確認、銀行保証
EPC コントラクター能力	スポンサー、ベンダー	コストオーバーラン、完工遅延	事前に建設実績確認
地質・地盤	EPC コントラクター、スポンサー、保険会社、ホスト国政府	予見性のレベル、契約により分担割合変化	事前調査の質（工事費・工期リスクの評価）と適切な契約
設計瑕疵	EPC コントラクター	EPC コントラクターの建設マネジメントリスク	EPC ターンキー契約（性能契約）
建設・完工遅延	EPC コントラクター		EPC ターンキー契約
性能未達	EPC コントラクター		EPC ターンキー契約
コストオーバーラン	EPC コントラクター、スポンサー（EPC 事由外）	予見外条件、スポンサーの途中変更要求など	EPC ターンキー契約 スポンサー予備費
EPC コントラクター LD 上限欠け目	スポンサー	契約と実態の乖離リスク	無理のない EPC ターンキー契約
操業段階			
制度変更	ホスト国政府	たとえば相対契約から自由市場へ移行	事業権契約
販売マーケットリスク(量・価格)	オフテーカー	当該サービス市場リスク	テイク・オア・ベ イ契約、デリバティブ
供給力(自然エネルギー)	スポンサー、オフテーカー	天候リスク等	見なし供給契約、デリバティブ
輸送・物流	スポンサー、オフテーカー	送電線事故など	保険
燃料調達	燃料会社	燃料供給の安定性	事前の供給力調査
燃料費変動	スポンサー、オフテーカー、燃料会社	燃料市場リスク	バスルー契約、固定化契約、デリバティブ
オフテーカー信用リスク	ホスト国政府	オフテーカーの財務内容	政府保証
燃料供給者信用リスク	スポンサー	燃料会社の財務内容	信用力ある燃料供給者選定
事業期間終了時売却価値	スポンサー	事業資産の市場価値	控えめな見積もり、あるいは計上しない（BOT）
建設・操業段階共通			
天災・不可抗力	保険会社、スポンサー	異常気象、大地震等	保険
カントリーリスク(戦争・テロ等)	スポンサー、コントラクター、ベンダー、保険・保証供与国、国際機関	途上国における事業特有のリスクであり計量化は困難。国際金融の枠組みに依拠した契約の巧拙がリスク内容。またヘッジしきれない側面を考慮の上でスポンサーの事業戦略リスク	政府債の格付け等評価 海外投資(NEXI)保険、JBIC 保証、国際機関(世銀、IFC、MIGA、ADB など)の参加、ローカルパートナーの選定
カントリーリスク(開発権剥奪・契約破棄)			
カントリーリスク(収用・所有権剥奪)			
カントリーリスク(外貨送金)			
ポリティカルリスク	スポンサー	スポンサーの事業スキル、関係者の事業評価能力	国際機関(世銀等)信用補完 実績ある調査・ステークホルダー雇用 ベンダー雇用専門家の質
ホスト国信用リスク・政府支援不足			
FS 瑕疵	スポンサー、ベンダー、EPC コントラクター	スポンサーの事業スキル、関係者の事業評価能力	実績ある調査・ステークホルダー雇用 ベンダー雇用専門家の質
為替変動	スポンサー、EPC コントラクター、オフテーカー、金融機関	為替市場のボラティリティ	先物予約、オプション、スワップ等 オフテーカー負担でゾーリン化
物価・労賃上昇	スポンサー、EPC コントラクター	マクロ経済と関連	長期契約、エスカレーションの折込み
利子率変動	ベンダー、スポンサー、EPC コントラクター	金融市場でのボラティリティ	固定金利、固定化契約等
保険支払いの欠け目	スポンサー、EPC コントラクター	保険免責内容	保険契約

出所：著者まとめ

略号：LD（瑕疵担保責任、Liquidated Damage）

注：リスク分担の詳細は当該プロジェクトにおける契約群において正確に定義されるものであり、本表の分担例は一般的にその割合が大きいと考えられる分担者を記載した。当然記載以外の分担者にも部分的あるいは間接的影響が起きうる。本表はプロジェクトファイナンススキームによる SPC からみたリスクとその顕在時に救済が行われる立場についてまとめられている。またサービスの提供は SPC とオフテーカーの相対契約下を想定する。

表 4.2.2 計量化リスクの種類と評価モデル例

収入・費用項目	リスク特性	評価モデル例
現地調査・調査工事	事業者意思決定	本研究第3章
建設予備費（事業者）	予見外リスク	経験的定数 確率評価—本研究第6章
明かり掘削・処理費 地下掘削・支保工	地盤リスク	空間的・力学的確率場 本研究第5章
化石燃料	石油市場リスク 石炭市場リスク	ウィナープロセス(対数正規過程)
発電量変動	水量・風況リスク	周期関数+確率場 (t分布, 正規分布, ワイブル分布, 等)
電力販売収入	電力価格市場リスク	ウィナープロセス(対数正規過程)
金利変動	金利市場リスク	ウィナープロセス(対数正規過程) 本研究第6章
為替変動	為替市場リスク	ウィナープロセス(対数正規過程)

注：建設中の天候異常による復旧工事保険，操業中の各種事故等に対する損害保険等，これまでに実績あるリスク回避策に相当する項目は表には計上していない。

#### 4.2.5 事業資産リスク計量評価の必要性

BIS 規制に対応した ALM の概念を事業資産に拡張することを試みることによって，資産リスクとその事業会社の財務構造への影響を明らかにすることができる．図 4.2.3 に事業リスクの保有は株主資本の充実を促す帰結となることを表している．すなわち，

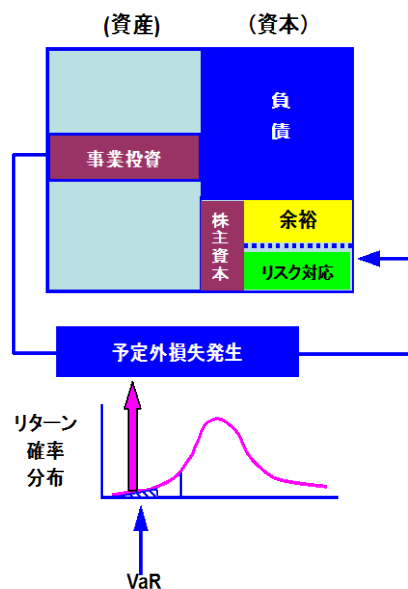


図 4.2.3 事業リスク計量と株主資本充実の概念

仮にある事業投資によってリスク資産を保有すると、ある確率で期待される資産価値を大きく減じ、総資産額を時価評価に減ずることとなる。このことによってバランスシートの資本の部に負債がある場合は、債務超過を生じせしめることになることが企業破綻のトリガーとなる。これを避けるために、資本調達を負債によらず、株主資本に依るところが大きい場合は、本来その毀損を潜在リスクと認識している出資者の損失によって、銀行への債務不履行を免れることができる。すなわち、出資者に事業継続の意志があればこの時点での企業破綻はない。

しかし、負債に対して株主資本の比率（Debt-Equity Ratio）を増加させることは、事業への出資者の期待リターンを減ずる効果をもたらす。このことを第5章で取扱うケースプロジェクトについて一定の条件下で分析し、結果を図4.2.4に示す。総資本における株主資本比率を20%から30%に増加させると、プロジェクト全体の収益率(IRR on Investment)は変化していないが株主資本収益率(IRR on Equity)は18%から16.5%まで低下していることがわかる。事業者すなわちSPCを設立し投資（出資）を行う立場からは事業の健全経営を通じて最大限の資本効率を求めることが企業にとってもその株主にとっても重要なことである。このために、SPCの資本構成においては条件の良いローンになるべく多く利用することが求められる。

一方、銀行の論理を考察してみる。金融機関のリスク管理がBIS規制に基づきALMなどの手法によって行われることを4.2.2項で述べたが、銀行が事業への融資を行う場合でもその債権管理において量的にまったく把握できないリスクを負うことはできない。SPCへの貸付において親会社の債務保証があれば、その債権リスクは親会社に対する債権の安全性の問題に置き換えられるが、プロジェクトファイナンスによるノンリコースもしくはリミテッドリコース案件への貸付においては、会社（SPC）に対する格付け機関の評価や過去の株価データによる統計的評価が得られないために、事業計画の確からしさについて客観性をもって見極める必要がある。このことがプロジェクトファイナンスの発達とともにリスク分析の必要性が高まる背景となっている。

プロジェクト資産を前提とした場合、仮に精算条項付き建設契約であれば、このような場合、支払い建設費の変動見込みが他の金融資産や債務保証付き債権に比肩して、その金額レベルにおいてではなく期待値回りの分散で認識できることがそのローン資産（銀行資産）を保有するために必要である。あるいは変動しない確定値として扱われる必要がある。その場合は、工事オーナーか履行能力あるEPCコントラクターが変動分を吸収できることが重要になってくる。すなわち企業の信用リスクの問題に転嫁される。

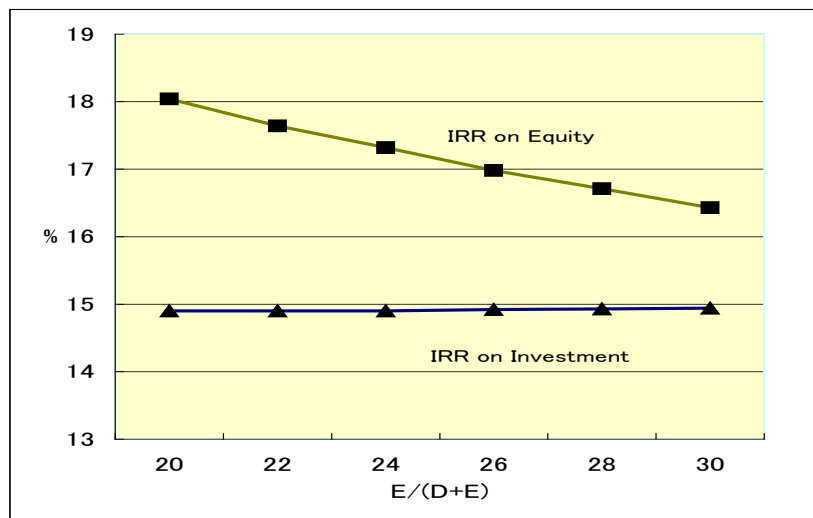


図 4.2.4 株主資本比率と IRR の関係（ケースプロジェクト）

このように、事業者（建設オーナー）、銀行、コントラクターはプロジェクトコストの変動分をめぐってそれぞれの事情をかかえているが、誰かがそのリスクをとらねばならず、誰もとれない場合は事業意義が社会で認識される限りにおいて公共事業とならねばならない。このようなことから民活事業を促進する観点から、リスクが計量できれば、銀行においては建設コスト変動リスクをすら分担できる論理的な可能性があると言える。

## 4.3 BOT 事業のリスクミティゲーションと投融資評価手法

### 4.3.1 事業評価の指標

前項において、事業資産リスクは金融資産リスクより複雑なリスク要素を持つことを述べたが、本項では、類似事業の経験を通して適切なリスク把握のもとに、スポンサーが事業投資決定するプロセスについて述べる。

企業の財務担当役員（CFO, Chief Financial Officer）が経営決定するために有用な判断基準とする手法についてGraham[8]らが 392 名に調査した結果によれば、IRR(Internal Rate of Return, 内部収益率), NPV(Net Present Value, 正味現在価値), ハードルレート, 投資回収期間, 感度分析, 収益資本比率, 現在価値投資回収期間, リアルオプション, 収益簿価, シミュレーション, 収益力, APV<sup>6</sup>などを挙げている。このうち、IRR, NPV, ハ

<sup>6</sup> APV(調整現在価値)アプローチ：企業買収(M&A)において、買収後に被買収会社の資産により借入等を返

ードルレートなどはいずれも投資に対して得られる収益の時間的割引の概念が入っていることがわかる。本研究においてもプロジェクトファイナンスの世界でも一般的に使用されるIRRを主要な事業性判断指標として議論を展開する。

IRRには複数の定義がある(表4.3.1)。ここでは、スポンサーが必ずしも配当収益だけではなくその事業(プロジェクト)を保有することに対して価値を認めることに着目しIRR on Equityを選択する。また融資者である銀行は当然事業全体の健全性を総合的に審査するが、融資債権がどの程度安全に確保されるかが基本的な関心とし、IRRとは別にDSCR(Debt Service Coverage Ratio)を確認することで、事業評価を計量的に行うための手法と本研究では位置づける。

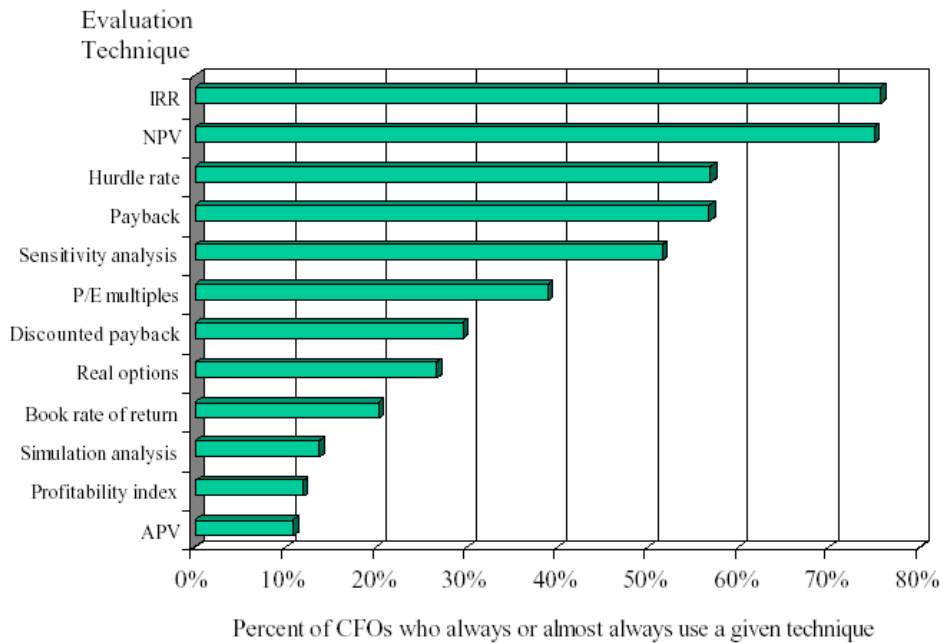


図 4.3.1 企業の投資評価アンケート[8]

表 4.3.1 IRRの種類

種 類		用 法	摘 要
Project IRR	事業内部収益率	負債、株主資本にかかわらず、投資額全体に対する収益率	事業全体の収益性の指標
Equity IRR	株主資本内部収益率	SPCの資本のうちスポンサーの出資額に対する収益率	SPCの株主価値
Dividend IRR	配当内部収益率	スポンサーの出資額に対し配当による収益率	スポンサーへのキャッシュリターン

済する手法で一時的に負債の割合が上昇する。

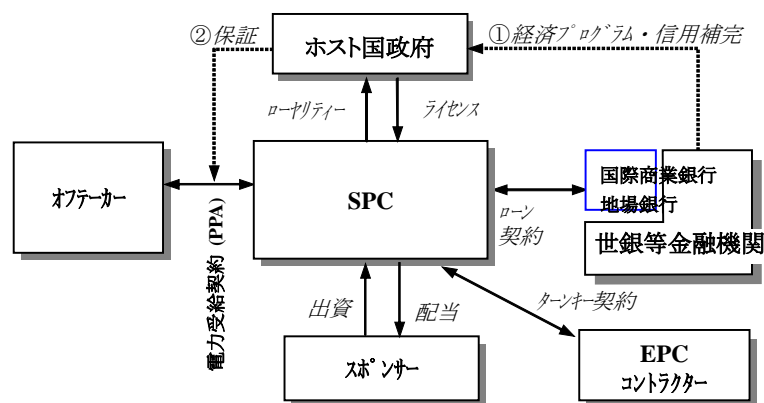


図 4.3.2 開発途上国 BOT 事業スキームの一般形

#### 4.3.2 計量管理困難リスクの事業スキームによる排除

##### (1) カントリーリスク

前項で述べた定性的リスクのうち、オフテーカーの信用リスクおよびカントリーリスクの分担構造を調べる。図4.3.2に一般的な開発途上国BOT事業スキームを示す。外国スポンサーおよび国際商業銀行にとって開発途上国の公企業や民間企業のリスクはカントリーリスクに内包され、その回避は必須である。このための仕組みとして、図の①で表わすように、ホスト国政府に対して経済支援のための融資や開発援助によって発言権を持つ世銀等（MDB<sup>7</sup>）、または二国間の経済協力関係によって多額の資金供与を行う ODAや輸出信用機関（JBICなど）が民間銀行とともに融資団に加わることにより、オフテーカーの債務不履行に対して強力な対抗力をホスト国政府に発揮することができる。またこれを可能ならしめるためには、オフテーカー（公共部門）のパフォーマンスをホスト国政府が保証している構造を有する必要がある、それが電力受給契約への政府保証（図4.3.2の②）である。この仕組みによって少なくとも銀行債権の保全がなされるということは、オフテーカーによる順当な支払いが継続されるということであるため、結果してSPCの健全経営、さらにスポンサーへの配当の安全性が高められることとなる。このようにして開発途上国のカントリーリスクが減じられる。政府保証のないプロジェクトについては、流動性の高い金融資産を高い利回りを求めて購入するのとは異なり、インフラ事業のように多額の投資を例えば20年などの長期に回収していくことを考えると、高いリスクを高いリターンに置きなおしても現在の電気料金が高価になるなど社会への影響が大きく非現実的となる。このように、インフラ事業の場合は、カントリ

<sup>7</sup> Multilateral Development Bank の略で世界銀行グループ、アジア開発銀行（ADB）などがある。

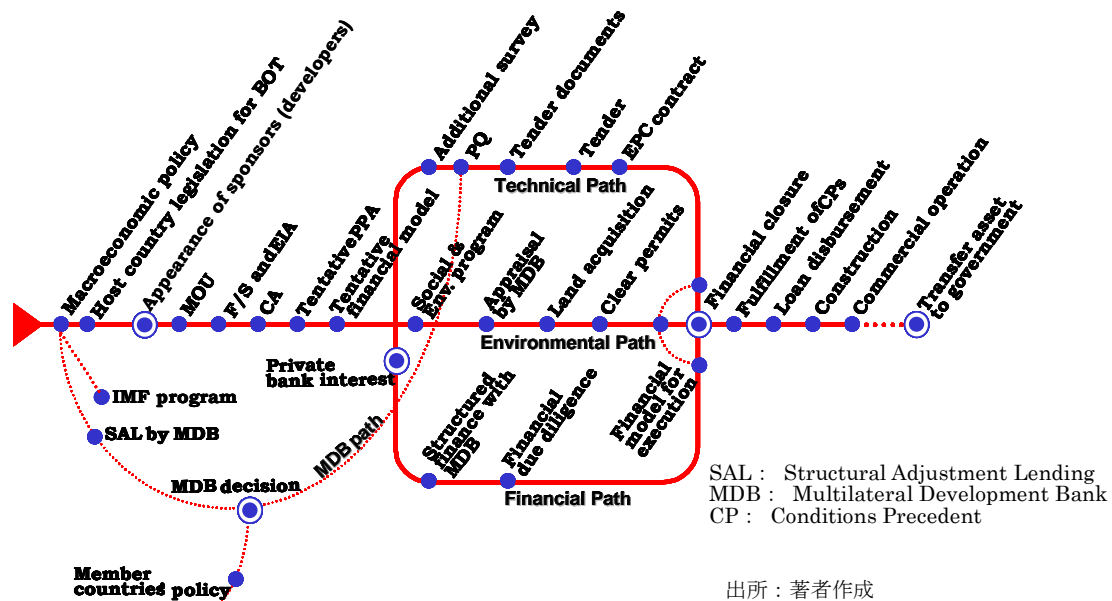


図4. 3. 3 開発途上国BOT事業の開発・建設プロセスの一般形[9]

ーリスクについてはその発現抑止力を持つ国際ファイナンススキームによって回避する構造が必須となる。このようなファイナンススキームではホスト国の経済政策やセクター開発政策等へのMDBの関与からプロセスが始まるため、手続きが複雑となるがホスト国政府のプロジェクト生成期からの関与によって、またそのMDBへの約束によってカントリーリスクの低減が実現し、ひいては外国資本の導入を容易にする効果がある。このような過程を図4. 3. 3に示す。

## (2) 燃料リスクおよび為替リスク

事業性に大きな影響を持つこれらのボラティリティについて現実的にはどのように処理されているのか、事例として、現在タイの電力事業で実際に行われているSPC事業について調べる。これはタイの環境対応型小規模発電（10万kW以下）に適用されるSPP(Small Power Producer)スキーム[10]による天然ガス発電事業である。本受給契約内容は公開されており、当該プロジェクトに限らず事業開発者はこれに従って発電公社と電力受給契約を締結できることが事前にわかっている。また実際にこのスキームによって開発が行われた実プロジェクトのひとつであるラヨン火力発電所のスポンサーは、日本企業およびタイ企業の合弁<sup>8</sup>であり、その事業スキームは図4. 3. 4に示す通りである。

<sup>8</sup> 日本側は電源開発(株)(J-Power)、タイ側は EGCO(Electricity Generating Company, Ltd.)



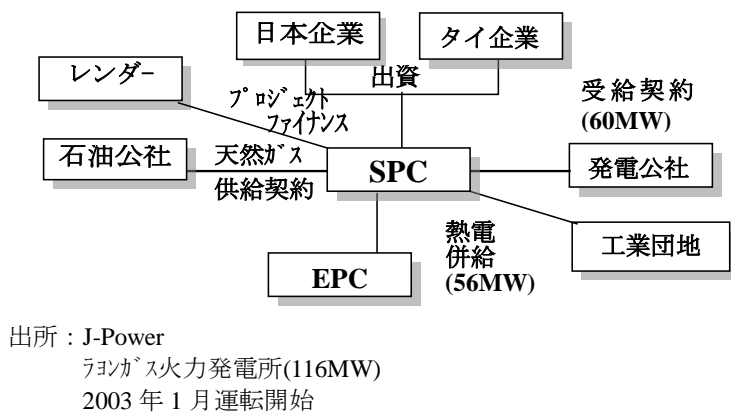


図 4.3.4 発電事業（タイ）スキーム例

SPPプログラムによる電力受給契約の料金価格フォーミュラを調べることによって、表4.2.2に示したリスク項目のうち市場リスクとしての燃料価格や為替のリスク分担構造がわかる。料金構造は設備規模（kW）比例によるキャパシティー・ペイメントと発電量（kWh）比例によるエネルギー・ペイメントの2部料金制となっている。

#### キャパシティー・ペイメント：CP

定額分が事業期間ごとに決められている。たとえば15年を超え20年以下の事業期間については以下のとおりである。単位はBaht/kW/monthである。

$$CP_0 = 227 \text{ (定額分)} \quad (4.1)$$

この基本料金は大半がハードカレンシー（USドル）による投資を行ったプロジェクトの資本回収に対応しているが、支払い通貨がバーツであることから以下のように1USドル=27バーツを規準として当期の支払額 $CP_t$ の80%の為替補正がなされる。

$$CP_t = CP_0 \{0.80(FX_t/27) + 0.20\} \quad (4.2)$$

ここに $FX_t$ は $t$ 月末日のドル・バーツの交換レート。

## エナジー・ペイメント：EP

定額分 $EP_0$ と燃料価格補正分 $EP_t$ によって構成される。単位はBaht/kWhである。

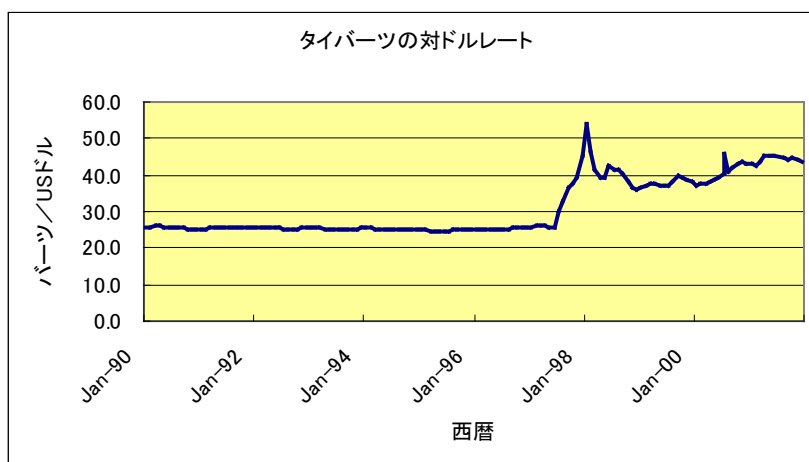
$$EP_0=0.85 \quad (\text{定額分}) \quad (4.3)$$

$$EP_t=(EP_0+ES_t) \quad (4.4)$$

ここに、 $ES_t=(1/10^6)(P_t-P_0)\times\text{Heat Rate}$

$P_t$ は当該月の石油公社からSPPに販売するガス価格であり、 $P_0$ は1995年8月の基準価格77.0812 (Baht/百万Btu)、Heat Rateは8,600Btu/kWhである。このように天然ガス燃料価格変動についても、式(4.4)に示すフォーミュラで市場価格変動を発電公社にリスク転嫁している。

つまり、事例プロジェクトの現場では、表4.2.2で述べた燃料市場価格リスクや為替など一次産品や金融市場におけるリスクはオフテーカーに大半が転嫁されて、SPCの事業リスクを大きく低減している。建設契約においてはEPCターンキー契約によってコントラクターが定額により建設を行った。これを前提に事業者は事業期間、レンダーは貸付期間にわたる長期リスクにコミットしプロジェクトファイナンスを成立させている。



出所：Bank of Thailand

図 4.3.5 タイ通貨の対米国ドルレートの変化

為替リスクに対してさらなる考察は、外国企業が保有する開発途上国の通貨保有に関する懸念が挙げられる。タイにおいても為替政策は都度重要なマクロ経済政策のひとつ

であり、1984年11月に米ドル連動（ペグ）から通過バスケットへの連動に変更したがバスケット内の米ドル比率は高く、基本的には米ドルに長年連動させてきたと言える。この結果、為替の安定も背景に海外からの資本流入が急速に増加し経常収支を悪化させ、株式と不動産バブルを招いたとされている。また海外の資金運用者や投機家がパーツの切り下げを予測して資金を引き上げ、97年7月にバスケット連動撤廃を余儀なくされた[11]。このことが図4.3.5に示すように97年を境に急激な為替のジャンプを生んでいる原因となっている。電力事業などは基本的にはその土地の通貨によって収入を得てハードカレンシーベースで利益を計上しなければならず、また長期安定的にサービスされるべきものであるにもかかわらず、外資が長い年月の事業期間の間にこうしたマクロ経済運営の急激な変化に追従することは難しい現実がある。また、そもそもプロジェクト投資において、海外先進国で製造される発電機器がハードカレンシーによって決済されることが、現地通貨収入とハードカレンシー支出のミスマッチの大きな原因にもなっている。このようなことから、電力受給契約においては、資本費部分において海外調達比率を意識した、内外貨2種類の通貨で契約される環境が用意されていると解釈される。

### (3) 金利変動リスク

金利もまた為替同様、国際マクロ経済の動きと大きく関係している。開発途上国がとくにおり経験するハイパーインフレが発生したときは、地場金利を高くし金融引締めが行われ、同時に為替の下落も速いスピードで進んでいる。このように金利変動についても電力受給契約などにより、SPC事業からリスク遮断するための調整条項を設けることも理屈上考えられるが、タイにおける為替のようなジャンプは通貨危機の際にも起きておらず、BOT事業環境のための制度的対象とはなっていない。従って、本研究では金利リスクの計量化について、第6章におけるケースプロジェクトの分析対象として注意深く取り上げることとする。

## 4.3.3 事業投資の基準

### (1) 資本コストとCAPM

投資にあたり、そのために使用する資本に必要なコストを知る必要がある。資産はそのコストを上回るリターンを実現しなければならないからである。投資する資産が仮に株式や債券などの金融資産の場合、一般的にその評価は資本・資産評価モデル（CAPM, Capital Asset Pricing Model）を使って行う。CAPMは株式投資分析の1つのアプローチとして1960年代に米国で確立された。株式市場全体のリスク・リターンを中立（ベン

チマーク)としたとき、株式などの金融資産のリスク・リターンがどの程度かを推定するモデルである。対象資産に対する期待収益率を  $E(r)$ 、当該国の国債利回り（無リスク利回り）を  $r_f$ 、株式のボラティリティ（標準偏差）を  $\sigma$ （個別）および  $\sigma_M$ （全銘柄の平均）として、CAPM は式 (4.5) のように、グラフは図 4.3.6 のように表される。

$$\begin{aligned} E(r) &= r_f + \frac{E(r_M) - r_f}{\sigma_M} \sigma \\ &= r_f + \beta (E(r_M) - r_f) \end{aligned} \quad (4.5)$$

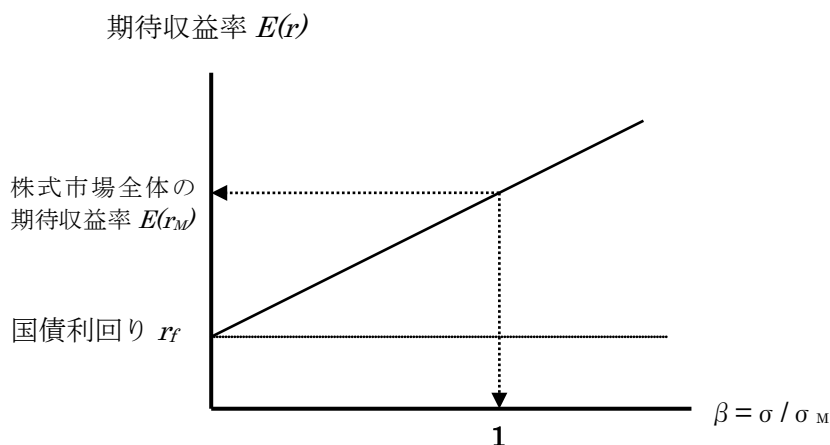


図 4.3.6 資産の期待収益率と  $\beta$

式(4.5)の通り、国債の利回り（タイの場合、タイ国債）と株式市場の収益率（株価指数の収益率）と  $\beta$ （ベータ）なる値を代入すれば資本コストが計算できる。 $\beta$  とは、株式市場全体の収益率に対して、どの程度任意の 1 企業の株価収益率が変化するかを表す指数である。もし案件の  $\beta$  が 1 であれば、株式市場全体が 1 動いたとき案件の株価収益率は 1 動くことになり、市場に対して中立的ということになる。 $\beta$  が 1 より大きいと、株価は市場に対してより大きく動くことになり、リスク（ボラティリティ）が高いことを意味し、逆に  $\beta$  が 1 より小さいと、市場が変動しても株価は大きく動かずリスクは小さい。ちなみに  $\beta$  が 0 であれば、株式のリターンは国債の利回りと同じになる。

企業の資本コストは、国債利回り、株式市場全体の期待収益率、その案件（事業）の  $\beta$  があれば CAPM を用いて推定できる。実務上は国債利回りや株式市場全体の期待収益率はデータが比較的整備されているが、 $\beta$  の入手は困難である。特定の産業や企業の株

価について銘柄数や統計的に意味のある十分な長さのヒストリカルを得ることが困難だからである。しかしながら、論理的に明快であり受動的なスタンスで投資対象資産が生むべきリターンが説明されるため、事業資産への投資においても、その行為が金融資産の購入に対して想定するリターンが高いか低いかのベンチマークとして扱うことができる。従ってここで算出された **IRR on Equity** が超えるべき資本コスト  $E(r)$  を投資基準（ハードルレート）として組み入れる必要がある。

## (2) WACC とハードルレート

CAPM によって株式市場で、あるいは株主資本として調達する資本のコストを求めた。しかし、プロジェクトのリターンを得るのは株主のみならずローンによって利回りを得る銀行（レンダー）も存在し、SPC から見た場合負債コストも存在する（税引き後）。従ってプロジェクト全体の資本コストとしては加重平均資本コスト(WACC, Weighted Average Cost of Capital)を求める必要がある。これは式(4.6)のように表わされる。

$$WACC = (1-t)K_D \frac{D}{D+E} + K_E \frac{E}{D+E} \quad (4.6)$$

ここに、 $t$ ：税率， $K_D$ ：調達金利， $K_E$ ：株主リターン比率， $D$ ：負債比率， $E$ ：株主資本比率である。WACC をハードルレートとした場合の IRR には **IRR on Investment** を対応させる必要がある。すなわち事業全体から生み出されるフリーキャッシュフローの現在が価値が総資本に等しくなるような **IRR** ということになる。資本提供者（株主と銀行）全体に対して健全な事業リターンを評価するために有用であるが、本研究においては、投資者と融資者について、それぞれ分けてその実行の妥当性を検討する立場から、投資側においては **IRR on Equity** と CAPM で求めた資本コストの関係、および融資側においては **DSCR** によって所定利回りローンの債権の安全性を検討する関係上、WACC による投資基準は使用しない。

### 4.3.4 融資の基準

銀行融資は金利および手数料を所定のローンライフに亘り求める。その背景には銀行のALMのような資産・負債管理の問題があることは4.2.1項で述べた。このような銀行の経営方針のもと、たとえば後述する銀行の融資条件を示すタームシート<sup>9</sup>(表4.4.1 参

<sup>9</sup> 銀行が借主にローンの条件を提示する書類をこう呼んでいる。

照)でも見られるように、具体的な融資の現場では金利水準はロンドン市場において銀行間で取引される預金金利であるLIBOR(London Inter-Bank Offered Rate)をコストとして銀行のマージン(スプレッド)を上乗せして決定される。また手数料はアップフロントフィー、コミットメントフィー、エージェントフィーなどからなるが、マージンに加えこれらを総合した利回り(イールド)をリターンとしてプロジェクトファイナンスを実行する。プロジェクトファイナンスによるローンも、銀行の保有する金融資産のポートフォリオ全体のうち、当該ローンはそのリスク・リターンを持ってそのある部分を構成することとなる。

当該ローンのリスク感に応じて生み出されるキャッシュフローが十分な返済能力を有しているかどうかチェックされる。このような指標に一般的に用いられるのがDSCR(Debt Service Coverage Ratio)である。ローンライフ全体に対して返済能力を見る場合はローンライフDSCR(Loan Life Coverage Ratio, LLCR)、また年度別(または期別)のDSCRをチェックし最小となる水準で安全率を見る。それぞれの定義を式(4.7)および(4.8)に示す。

$$LLCR = \frac{\sum (\text{元利支払前キャッシュフロー})}{\text{借入金元本}} \quad (4.7)$$

$$DSCR(\text{期別}) = \frac{\text{期中元利支払前キャッシュフロー (税引き後)}}{\text{期中元利支払予定額}} \quad (4.8)$$

期別最小DSCRが満たすべき水準についてKhanらは目安を調査している(表4.3.2)。また当然、銀行間において資産ポートフォリオの違い、財務体質の違いなどから、一概にこの数字が基準であるとは言えない。本研究においては建設費の予測に対して実際の変動について、またローン返済期間中にも市場金利が変動するケースにおいて、これらを原因とするキャッシュフローの変動を計測し、DSCRを確定値ではなく確率値として表わすことを第5章および第6章で試みる。

表 4.3.2 プロジェクト採択最小 DSCR（銀行）

事業特性	目安 DSCR	適用プロジェクト
サービス全量買取り，為替リスクなし	1.20-1.30	UK 国内 PFI，米国内 PFI
サービス全量買取り，為替リスクあり	1.30-1.40	途上国 IPP プロジェクト，上水道，廃棄物処分場
サービス全量買取り，価格リスク，為替リスクなし	1.30-1.80	資源ビジネス，アグロビジネス
サービス引取の量的保証なし，為替リスクあり	1.50-1.90	コンテナターミナル，マーチャント発電所
サービス引取の量的保証なし，為替リスクあり	1.75-2.00	有料道路

出所：M. Fouzul Kabir Khan, et al. [6]

表 4.3.2 の DSCR の基準によれば，SPC の事業の特性から見て，サービスの買取保証の有無，為替リスクの有無，サービス価格リスクの有無，に応じて SPC の事業から生み出される返済原資に対する信頼性を DSCR で表しているとも言える。

#### 4.3.5 評価期間の設定

本ケースプロジェクトの事業評価にあたっては，プロジェクトの終了をどう定義し何年間の操業を前提とするかが問題となる．近年のインフラ施設の維持・補修問題によって考え方が整理できる（たとえば [12]）．

一般に施設の物理的耐用年数やサービス提供期間は，評価対象期間設定のための基礎情報となるが，評価対象期間は資産の寿命と一致することもあれば，しないこともある．特定の施設を対象にライフサイクルコストを評価するケースでは，評価対象期間を施設の耐用年数よりも短く設定する考え方が用いられることが企業経営において合理的と思える．その理由は，評価主体の時間概念が資産の耐用年数よりも短いことにある．しかし，ケースプロジェクトのように電力インフラ施設でありかつ，物理的耐用年数が長期間にわたるものについては，短期的な評価では，長期的寿命におけるプロジェクト保有者間の負担問題などが発生する．一般的にこのような場合，以下のような考え方の整理が有りうる．

##### ①半永久的な期間設定

遠い将来のコスト想定に不確実性を伴うので，実務的に説得力が不足する．た

だし、著しく小さい割引率を用いない限り、遠い将来の不確実性の影響は、割引きによって低減される。

②少なくとも1回の大規模回収や更新を含む期間設定

施設利用の1サイクルを含むので、ライフサイクルにおける費用項目は、ほぼ全て網羅される。更新サイクルが長期に亘る場合には、多額の更新費用の規模と発生時期の想定に多大な不確実性を伴う。

③更新、大規模改修を含まない期間設定

ライフサイクルコストが複数のコストの合算で評価される場合、各コストの評価対象期間は一致させなければならない。

第5章以降で検討するケースプロジェクトにおいてはタイ国が採用する BOT 水力案件の PPA 期間が 30 年に及ぶものがあることを考慮し、本研究においては上記の a) の考え方にに基づき 30 年の評価期間とする。

一方、システムの中で最も主要な施設の耐用年数を評価対象期間として、それよりも短い耐用年数の施設については更新費を見込み、耐用年数がより長期になる施設は残存価値を考慮する必要があるが、施設の一部機能を担う資産は当該地点での売却を想定した場合の再販、価値が利用実態に基づく評価よりも著しく小さい値となることなどを考え、本研究においては残存価値は無いものとする。

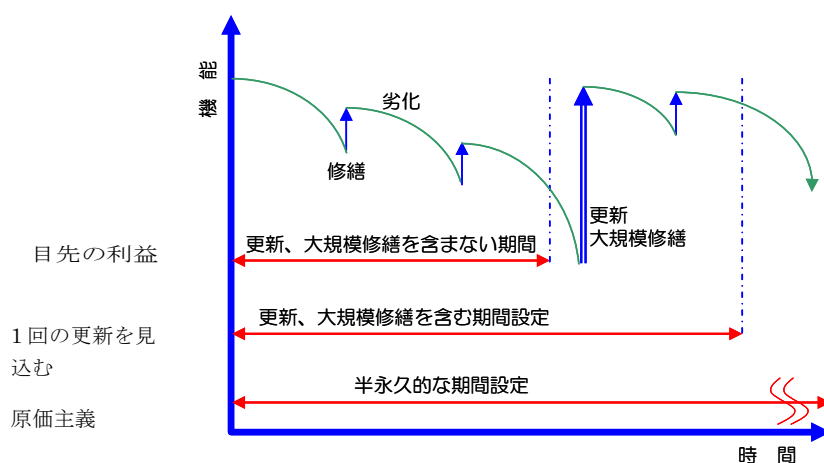


図 4.3.7 事業評価期間の考え方



## 4.4 キャッシュフローの不確実性

### 4.4.1 キャッシュフローの確実性とローン

プロジェクト資産がスポンサーやそのローン資産を保有する銀行にとって、リスク資産であることはここまでに述べたが、一方でそのリスクヘッジも可能な限り行い、自らのリスクマネジメントの範疇を制御あるいは管理できる範囲に限定する必要がある。このことは4.3.3項でも触れた。その上で、なお事業キャッシュフローは種々の不確実性を残しており、これらをうまく制御あるいは管理できるかがプロジェクトによる事業の健全性につながる。また、銀行にとって良好な債権資産の一部とすることができる。

そのような不確実性のうち計量化できるものとして表4.2.2に示したような項目があらためて挙げられる。そのうち4.3.4項で述べたようにローンの金利については、プロジェクトスキームによるリスク回避が通常行われることはなく、SPCから見て固定金利契約として事前に高い利率を設定してレンダーにとって可能な期間リスク回避するか、変動金利として金利の市場変動を見込むか、ローンをいくつかの部分（トランシェ）に分けて、固定部分と変動部分を混合するかの選択となる。

いずれにしろ、将来の金利変動のリスクは、SPC（ひいてはスポンサーの収益）、レンダー、オフテーカーの誰かが分担しなければならない。この場合、オフテーカーが金利リスクを分担する理由は一般的に考えられないため、最終的にはスポンサーによる「高い固定金利」か「リスクをとった変動金利」の選択の問題となる。さらにレンダーは金融資産のポートフォリオ上、長期間の固定金利による貸し出しを多くの債権で保有することは困難であるため、キャッシュフローの不確実性の重要な要素として銀行ローンの金利リスクを考えておく必要がある。このようにキャッシュフローの不確実性として重要な要素として、建設リスク、収入リスク、金利リスクを織り込んだ模式図を図4.4.1に示す。波型はキャッシュフロー計算書の各数値に不確実性があることを示している。

プロジェクトファイナンスとりわけノンリコースローンを有する事業スキームにおいては、4.3.5項で述べたように銀行が債務返済の確実性を求めて最小DSCRを基準に持つ。これをSPCのキャッシュフローで考えてみると図4.4.1に模式的に示すように、①建設費の不確実性、②収入の不確実性、③支出の不確実性、④事業終了時資産価格の不確実性、によって事業キャッシュフローは本来的に不確実性を有したまま事業が推進される。なお同図では株主資本と負債によるキャッシュインと元本返済のキャッシュアウトは変動に焦点をあてるため図に表示していない。しかし、この不確実性について

4.3.3 項で述べたように契約によって SPC から見たリスク排除が一般的に行われるが、長期ローンの金利については SPC にとって選択的な問題となる。

すなわち、長期ローン金利を長期固定すればそれだけ銀行側でリスク対処した高い金利を支払うか、変動金利を受け入れればたとえば国際的な金利指標となる LIBOR に定額の銀行手数料を乗せるのみで SPC 側で長期金利のリスク対処を行うかの選択を行うこととなる。このため事業者側でこの得失について見極める必要がある。従って、いずれの場合においても発生する変動金利の評価を行う必要がある。ただし、現実のコーポレートファイナンスにおいては、インフラ事業のように事業開始時に大きな固定資産を形成する場合、事業者としても銀行としても金利変動リスクは回避する傾向にあり、事業開始初期の段階は固定金利とし、一定の期間後に変動金利を採択することが多い。

このようなケースについて表 4.4.1 に実例<sup>10</sup>を示す。この例では借入れ後 5 年以降、変動金利としている。また完工後リファイナンス（ローンの借り換え）事例であるが、当初とリファイナンス後の金利の違いが建設リスクに対して銀行が評価したプレミアムと言える。

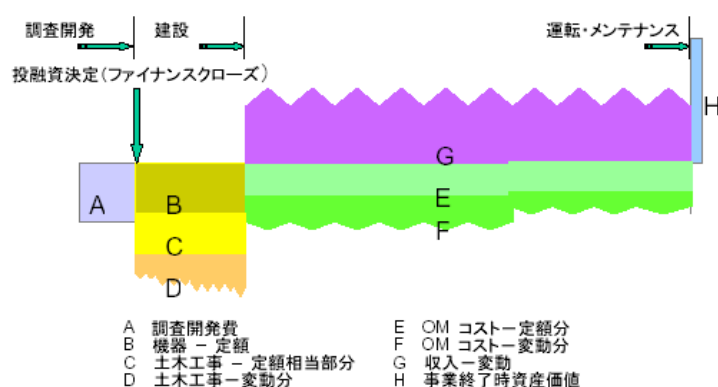


図 4.4.1 キャッシュフローの不確実性（模式図）

<sup>10</sup> ただし守秘義務の関係により著者が内容の一般化を行い、数値も実際とは異なる。

表 4.4.1 ローンの貸付条件例

項 目	建設前貸付済みローン	完工後ローン
銀行団	P 銀行, Q 銀行, R 銀行	Q 銀行, R 銀行
貸付額	Tranche A USD 150 mil. Tranche B THB 3,750 mil.(=150 mil .USD)	USD 26.81 mil. THB 952.01 mil.
満期 (Maturity)	1995 年×月×日より 13.5 年	2000 年×月×日より 11 年
利子率	Tranche A LIBOR+2.75% Tranche B P,Q,R 平均 MLR+0.25%	LIBOR+2.5% 1-2 年固定 3.75% ,3-5 年固定 4.00%,以降 QR 平均 MLR-0.50%
返済条件	元本：半年毎(23 回, 第 1 回×月×日) 利子：USD ポーション 半年毎 THB ポーション 月末	元本：半年毎(21 回, 第 1 回×月×日) 利子：USD ポーション 同左 THB ポーション 同左
コミットメント・フィー	Tr.A 0.375 % p.a. Tr.B 0.250 % p.a. Tr.C 0.250 % p.a.	同左 同左 チャージ無し
クレジット・エージェント・フィー	THB 750,000 p.a.	THB 500,000 p.a.
セキュリティー・エージェント・フィー	THB 750,000 p.a.	THB 500,000 p.a.
必要口座	セキュリティー・エージェント口座 運転費口座 定期点検積み立て口座 デット・サービス・リザーブ・アカウント デイトリビューション・アカウント 保険口座	同左 同左 同左 同左 同左 廃止
SPC 財務指標条件	(1) D : E レシオ ≤ 2.41 : 1 (2) 保証付き負債 : クイティ ≤ 7 : 3 (3) DSCR ≥ 1.1 : 1 (4) 以下のときデイトリビューション口座に送金 DSCR ≥ 1.25 : 1 流動比率 ≥ 1.0 : 1	(1) D : E レシオ ≤ 2.5 : 1 (2) キャンセル (3) DSCR ≥ 1.1 : 1 (4) DSCR ≥ 1.1 : 1 流動比率 ≥ 1.0 : 1
スポンサー・サポート	キャッシュ不足 : THB 200 mil. コスト・オーバーラン : THB 50 mil.	同左 キャンセル
地元スポンサーの行うサポート	保証債務の残高相当額	キャンセル

注：USD=米国ドル，THB=タイバーツ，単位：mil.=百万，Tr.=トランシェ，OD=オーバードラフト，  
MOR= Minimum Overdraft Rate, MLR= Minimum Loan Rate

#### 4.4.2 ダイナミックキャッシュフローによる投融資評価

前項で銀行がローン金利の固定化に要するスプレッドを必要とすることを述べたが、インフラ事業が本来的に内包する金利リスクについて、またその他のリスクについて、キャッシュフローモデルそのものに投入するデータが本来固定値ではないことを考えると、キャッシュフロー計算を確率的な扱いにして、入力変数のボラティリティから投融資判断とする主要な計算結果をもボラティリティで表現することが、より恣意性の小さい評価手法につながると考えられる。4.2.2 項で述べたように金融資産については金融機関において ALM としてこのことが認識されており、事業資産を有する SPC においても同様の試みの可能性を見いだせる。

このようなキャッシュフロー計算後の DSCR のボラティリティについて、銀行の求める最小 DSCR を割り込むリスク相当分についてのみ、SPC の親会社であるスポンサー会

社の保証行為を行うことは事業リスク分担の一方法として合理的であると考えられる。ただし、分担の境界線はそのときどきのレンダーとスポンサーの置かれた事業環境下における交渉的要素があることは言うまでもない。

以上、表 4.2.2 で示した計量化リスクと事業スキームとリスク分担について考察してきた。このように途上国における揚水発電所 BOT プロジェクトの実際として、民間部門が分担すべきリスクで確率的に計量すべき内容は結局、表 4.4.2 のようにローンの金利リスクと地盤リスクに整理される。

表 4.4.2 ダイナミックキャッシュフローと計量化リスク

収入・費用項目	リスク特性	評価モデル例
明かり掘削・処理費 地下掘削・支保工	地盤リスク	空間的・力学的確率場
金利変動	金利市場リスク	ウィーナープロセス(対数正規過程)

このうち金利リスクについては、ウィーナー過程モデルを採用するならばそのボラティリティ（標準偏差）は時間依存するため、キャッシュフローモデルに投入する本研究では月次とする各期の金利水準については正規分布で与えるのではなく、各期毎にブラウン運動する金利データを設定する試行回数の乱数群を用いて与える必要がある。このようなリスク特性の違いを表 4.4.3 に示す。

また地盤リスクが他の市場リスクと本質的に異なるのは、市場リスクが人為的な経済社会における行動の結果生み出されるものであることに対し、地盤リスクはサイトの地質が構成された地質年代以降、すでに決定された事象がまだ人間に開示されていないという意味でもリスクとして認識されることである。この事象は調査ボーリングや工事の進展に応じて明らかになっていく訳であるから、市場リスクが時間領域（time domain）であるのに対し、地質リスクは空間領域（spatial domain）にあると言える。

しかしながらこのようにリスクの属性が異なっても、キャッシュフロー上でこれらボラティリティを表現することは可能であり、投融資基準を変えることなく結果として得られる IRR や DSCR を評価することができる。第 3 章において地盤リスクをキャッシュフロー上で扱えるように最尤期待平均値とボラティリティを定義した。この確率分布に基づいたモンテカルロシミュレーションを実行することによって目的パラメータ（IRR や DSCR）を確率分布として得ることができる [13]。

表 4.4.3 地盤リスクと市場性リスク

	地盤リスク	市場性リスク
リスク所在の領域	3次元空間（既に存在している）	時間領域
変動の認識	工事進行に伴い人間の観察によって、その実態を知覚したとき	時々刻々の変化を市場情報として知る
観測値の特性	事業初期（建設終了まで）の間にリスク発現してしまう	事業期間終了後にリスク総量が認識される
コントロール	不可能	ほぼ不可能
ヘッジ	多数の工事により平均化の方向に向かう	多数の金融資産によりヘッジ可能（ポートフォリオ）

#### 4.4.3 建設工事起因のリスク分担

建設リスク起因のキャッシュフローリスクにおいては、金融機関にとって馴染みの薄いリスク要因、たとえば地盤リスクに基づくコストオーバーランが発生する問題、等についてはプロジェクトオーナーもしくはEPCコントラクターの分担と必要がある。第3章で示したように、ある要因に基づく建設リスクが計量的に明らかになった場合、ローンを供与しようとする銀行とのDSCRの合意値（通常は余裕を見て1.0よりも大きな値）を実現できない領域に至るほど建設費が大きい場合は、銀行以外のプレーヤーによってリスク分担されることがローン実現の要件となる。その概念をDSCRをパラメータとして図4.4.2に示す。従来の建設契約においても土木工事保険などによって予見できない地質条件（unforeseeable geological condition）の発現かつ事故の発生によって保険求償が可能であった。しかし、予見できる地質変動の範囲で建設費の変動範囲が明確にされることはなく、プロジェクトファイナンスによるノンリコースローン（またはリミ

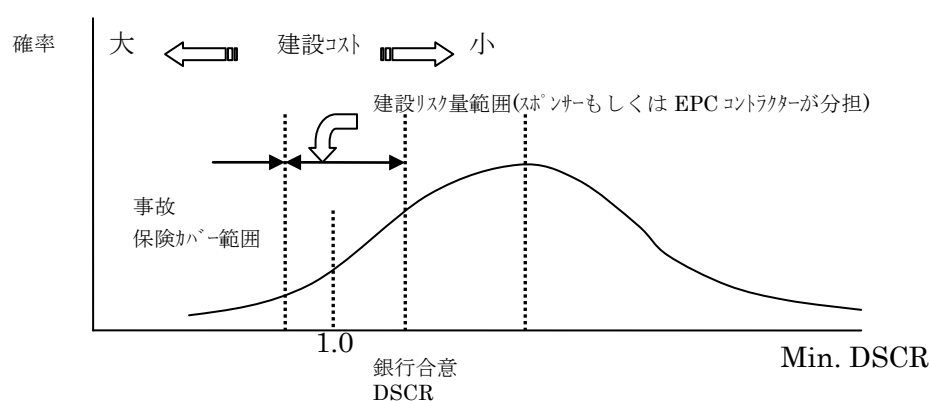


図 4.4.2 DSCR からみたリスク分担

テッドリコースローン)を適用することには、EPC コントラクターによる完工責任を条件として、またはスポンサーの完工責任が要求される事例もある。このような契約交渉においては、誰が保険でカバーされない建設費変動を分担すべきかという単純な問題に帰着するが、建設費の変動をキャッシュフロー分析にかけ、銀行ローン債権の安全性を DSCR で計測して貸し出し金利を決定したあと、建設工事のオーナーと EPC コントラクターの責任範囲を明確にすることができるはずである。さらに、建設工事オーナーと EPC コントラクターが潜在リスクにどのくらい対応する能力があるかによって、①BOQ 契約によってオーナーがリスク負担、②EPC ターンキー契約によってコントラクターがリスク負担、の選択の問題となっていく。ここで述べる「能力」とは建設工事のオーナーあるいは EPC コントラクターの財務耐力、すなわち図 4.2.2 で示したような株主資本比率が象徴的であり、十分な経験に裏打ちされたリスクマネジメント能力であると言える。

このようにリスク分担の考え方を整理すると、従来プラント事業などでは実現したプロジェクトファイナンスが、土木工事の割合の大きい事業においても、銀行、建設オーナー (SPC のスポンサー)、EPC コントラクター、保険会社の全員が自己が分担するリスクを計量的に認識しながら実現できる可能性が高まる。ここまでに述べた建設リスクと事業評価の取り扱いに関する考え方は図 4.4.3 のフローチャートに整理した。

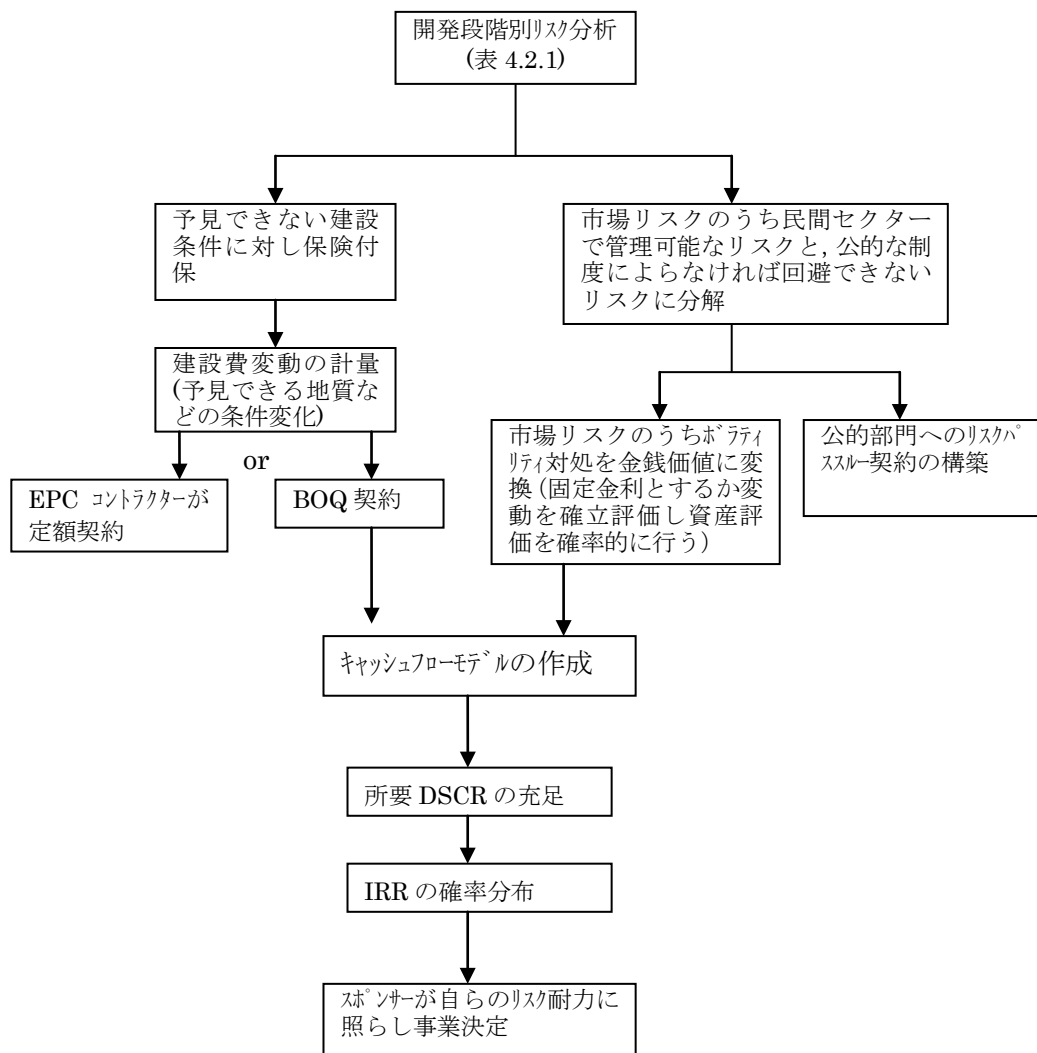


図 4.4.3 建設リスクと事業評価

## 4.5 結 語

本章においては、民間インフラ事業のリスクに関する考察を行いリスクの全体像を明らかにするとともに、事業スキームや制度によって回避されるリスクと、市場において計量でき銀行や事業会社において管理可能なものに分類した。また為替のように市場が存在してもインフラ事業の特性から実態的に契約構造によって公的部門がリスク分担する仕組みである必要性などを考察した。

さらに、建設費変動リスクの分担の考え方を金融機関の観点から整理することを試みた。第3章においてトンネルや地下空洞の地質要因に基づく建設費変動リスクを確率評価できることが示され、本章で述べた建設以外のプロジェクトリスクと合わせ、プロジェクトファイナンスの実現を意図した土木工事を多量に含むプロジェクトの事業性について、その評価方法を提案する。すなわち図4.4.3のようなフローで事業リスク評価が適切で、その適用においては以下のようなまとめを行うことができる。

- ①事業を開発段階、建設段階、操業段階に分け、それぞれのリスク項目を洗い出し、建設リスク、市場リスクの両方において、計量できるリスクとできないリスクに分ける。
- ②計量や制御ができないリスク、a)たとえば予見できない地質の出現や天災不可抗力等による想定外の支出増、b)途上国の信用リスク等計量が難しくかつ民間セクターがコントロールできないリスク、c)為替リスクなど計量できるがボラティリティが大きすぎる場合、など保険や事業契約内容に依存すべき事項を抽出する。
- ③計量できるリスクは、地質条件に基づく建設費変動リスク、金利など市場が形成されそこでの支出額変動リスク、などはキャッシュフローにおいて感度分析やモンテカルロシミュレーションを用いたダイナミックキャッシュフロー分析を行い、銀行が必要とする DSCR を確保し、スポンサーが必要とする IRR が達成できるか評価する。
- ④銀行が必要とする DSCR が確率的に規定される場合は、必要な DSCR の信頼度（たとえば 90%信頼度）を満たす保証建設費を銀行と約定し、それよりも建設費が増えることによる事業性悪化を原因とする債務返済に関して EPC コントラクターもし



くはスポンサーがそのリスク分担する手法を用いることができる。

以上のような手法によって、地盤リスク（地質条件リスク）を有する土木工事を含むプロジェクトへの民間投資評価を合理的に行うことができる。ただしこの手法には表 4.2.1 に示すように、定性的あるいは非計量なリスクはあくまで、スポンサーの努力や投資環境を整える制度によるリスク処理と組み合わせる必要があることが前提である。

## 参考文献

- [1] Crouhy M., Galai D. and Mark R. : Risk Management (リスクマネジメント) , 三浦良造他訳, pp.32-25, 共立出版, 2004.
- [2] 弥永真生 : リーガルマインド会社法, pp.24, 有斐閣, 2000.
- [3] 山下智志 : 市場リスクの計量化と VaR, 朝倉書店, 2000.
- [4] 古賀智敏, 河崎照行, 編著 : リスクマネジメントと会計, 同文館出版, 2003.
- [5] (社)金融財政事情研究会編 : ALMー総合的資産・負債管理の手法, pp. 13-14, 2003.
- [6] Khan, M.F.K., Parra, R.J : Financing Large Projects, pp.331, Prentice Hall, Pearson Education Asia, 2003.
- [7] 高尾厚 : 保険とオプションーデリバティブの一原型ー, 千倉書房, pp.51, 1998.
- [8] Graham J.R. and Harvey C.R : The theory and practice of corporate finance : Evidence from the field, Journal of Financial Economics 61, Fig.3, 2001.
- [9] Onoi, Y., Kawata, N. and Niimura, T. : Hydropower Financing Transition in Developing Countries, International Commission on Large Dams, Q.80 –R.6, Montreal, June 2003.
- [10] Regulations for the Purchase of Power from Small Power Producers, Electricity Generating Authority of Thailand(EGAT), Metropolitan Electricity Authority (MEA), Provincial Electricity Authority (PEA), January 1998.
- [11] Pakorn, V. : タイの金融構造の変化と 1997 年通貨危機, Thailand Development Research Institute (タイ開発研究所) , 2004.
- [12] 石原克治 : たかがライフサイクルコストされどライフサイクルコスト, 建設マネジメント勉強会サマースクール, pp.59-68, 2003.
- [13] Evans, J.R. and Olson, D.L. : Introduction to Simulation and Risk Analysis, Prentice Hall, 1998.

## 第5章 地盤リスクの PFI プロジェクト事業性への影響に関する実証的研究

### 5.1 緒言

本研究の中心的テーマである地下構造物を有するプロジェクトリスクについて、第3章および第4章において準備してきたように、自然リスクのひとつである地盤リスクや事業リスクのうち金利などの市場リスクは、リスク分担によってその管理が得意な特定のプレーヤーに任せることで完全に回避しきれ性格のものではなく、誰が取るリスクにせよその計量化によって事業への影響を評価することが望ましい。ここでは実際のプロジェクトを題材としたケースプロジェクトを設定し、事業評価モデルについて実証的検討を加えることとする。

ケースプロジェクトの設定にあたっては、相当規模の地下構造物を有すること、建設が終了していること、また民間事業としてのリスク評価が検討しうる必要があること、このような観点から地下発電所を有する揚水式発電所事業を採択した。本発電所はタイ国において発電公社 (Electricity Generating Authority of Thailand, EGAT) が事業主として、世界銀行が土木工事部分に、我が国のJBIC<sup>1</sup>が機器を対象に融資した資金とEGATが自己調達した資金によって建設したラムタコン揚水発電所である。フィージビリティスタディはJICA<sup>2</sup>によって1991年に実施された[1]。ただしケーススタディとして一定の仮定のもとで民間事業として設定しなおすこと、またモデルの実証研究として詳細なプロジェクトの事実について捨象している部分があることから、当該プロジェクト名を冠することは妥当でないため、実プロジェクトを背景としながらも、あくまでも本研究におけるケースプロジェクトであることを明記する。

---

<sup>1</sup> Japan Bank for International Cooperation (本案件承認時は OECF - The Overseas Economic Cooperation Fund であった)

<sup>2</sup> Japan International Cooperation Agency

## 5.2 ケースプロジェクトの概要

### 5.2.1 発電所全体構造の概要

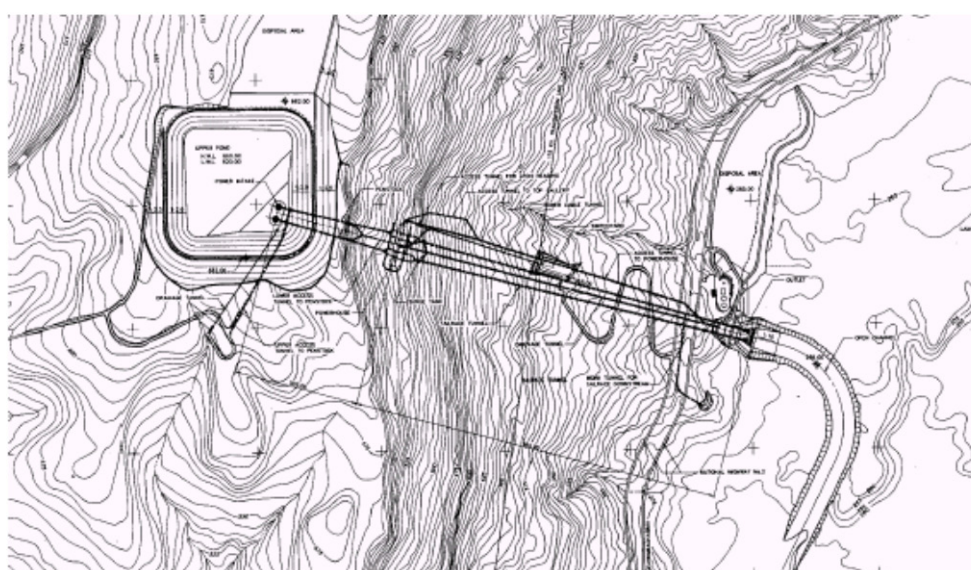
ケースプロジェクトとして採択した発電所の諸元を表 5.2.1 に、レイアウトを図 5.2.1 に示す。表 5.2.1 に示す通り、掘込みと盛り立てで構成する 1,030 万 m<sup>3</sup>を湛える上部調整池、長さ 690m の圧力水路トンネルを経て地下式発電所が設け発電を行う。さらに放水路トンネルによって下池となる既設の人造湖に発電した水が導かれる。揚水時は逆モードとなり送電線によって電力系統から受電した発電機・タービンが揚水ポンプとなる。

表 5.2.1 ケースプロジェクト構造物および発電諸元

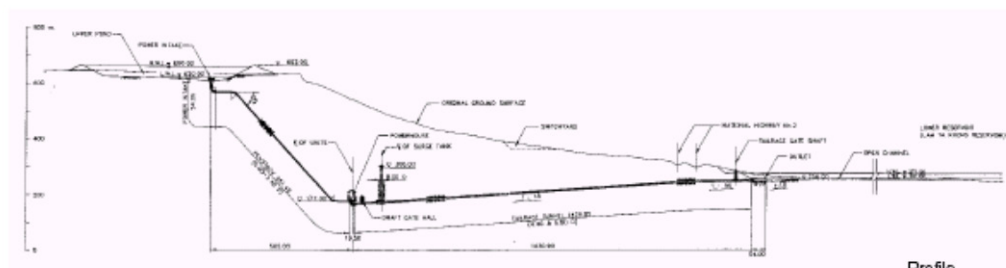
	仕 様	摘 要
(構造物)		
上部調整池	貯水容量 1,030 万 m <sup>3</sup> 、高さ 60m、遮水面積 36 万 m <sup>2</sup>	掘り込み式、アスファルトフェーシング <sup>*</sup>
取水口	φ18m, 2 基	朝顔型
水圧管路トンネル	φ5.8-2.6 m x 690m, 2 条, 4 分岐	
地下発電所	W:H:L=22m:45.7m:117m	
変圧器室	W:H:L=20m:25.5m:108m	
放水路トンネル	φ4.9-6.6 m x 1470m, 2 条	
調圧水槽	φ8.9m, H107m, 2 基	上部水室付き
放水口	W:H:L=(6.6-30):(6.6-10)x55m, 2 基	ボックスカルバート
(発電諸元)		
平均有効落差	357m	発電時
最大揚程	409.2m	揚水時
発電機	278MVA, 4 基	出力 250MW
タービン	縦軸フランシス型, 4 基	
周波数	50Hz	

本プロジェクトは環境影響を最小化する観点から、大空洞による地下発電所を中心としたトンネル群を含む地下工事が多い。地質は概ね砂岩・シルト岩の互層で構成されており、地表踏査、ボーリングコア、弾性波探査、などの結果が整理され、入札書類の一部としてオーナー側から開示された。また第3章で岩盤分類について述べたように、あらかじめ土木工事契約書類に岩盤分類の方法と分類別支保工が規定され、それに基づいてコンクリート吹付けやロックボルトの仕様・数量が決定されており、それを基準として変更が生じた場合の数量精算が行われる方法がとられた。

土木工事ロットの他、電気機器契約、ゲート・鉄管類契約は、それぞれのロットとして独立に入札が行われ、これらのロットや定額によるランプサム契約が行われた。



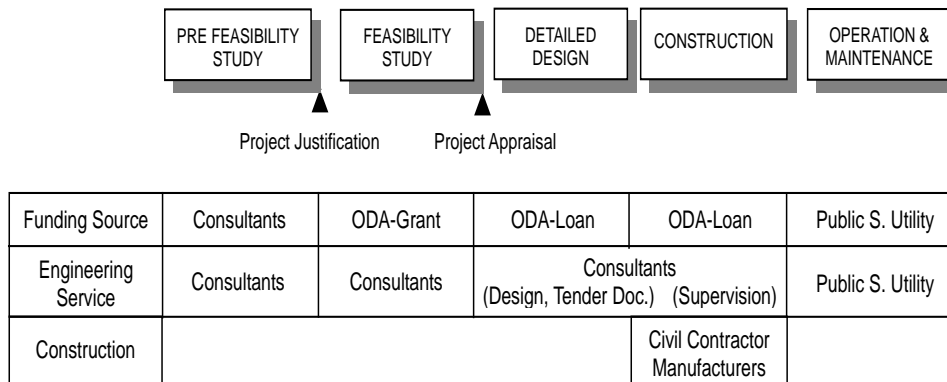
General Plan



Profile

図 5.2.1 ケースプロジェクトのレイアウト

### Public Sector Development (ODA) Case



### BOT Development (PFI) Case

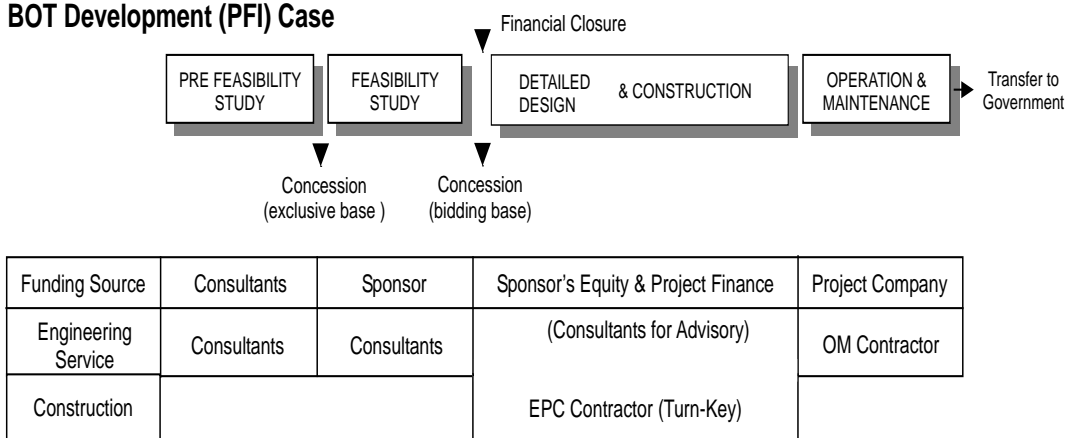


図 5.2.2 公的事業および PFI 事業における開発・操業スキーム

## 5.2.2 ケースプロジェクトの開発・運営スキーム

### (1) 公的事業と PFI 事業スキーム

ケースプロジェクトは 5.1 節「緒言」で述べたとおり発電公社による公的な開発・運用が前提となったプロジェクトをモデルとしている。本研究では、プロジェクトが PFI 手法による民間投資・経営が可能であるかどうかを評価することを目的とする。このために事業主体は民間会社たる SPC とし、SPC が工事のオーナーとなることを想定している。また事業評価は SPC のプロジェクトライフにわたる財務的健全性に主眼を置き、事業経営のためのメンテナンス業務等については評価対象外として、フィージビリティスタディで想定された一定の支出が行われるものと想定している。

公的事業スキームと PFI を前提とした事業スキームについて図 5.2.2 に開発にかかわるプレーヤーおよび開発・操業の各フェーズにおける役割分担を示す。また、PFI を前提とした開発の概要を表 5.2.2 に示す。

### (2) 公的事業スキーム

本ケースプロジェクトは本来、タイ政府の保証下において発電公社が世界銀行および JBIC から外貨分について ODA による貸し付けを受け、内貨相当分は自己資金として充当するものであり、建設された事業資産は公社の所有となるものである。図 5.2.3 に示すとおり建設については各ロット毎に発電公社から発注されており、個別ロットの工事完了とは別にロット間の境界的機能を含め総合的な性能確保の最終局面は発電公社が自らの責任で行うこととなっている。

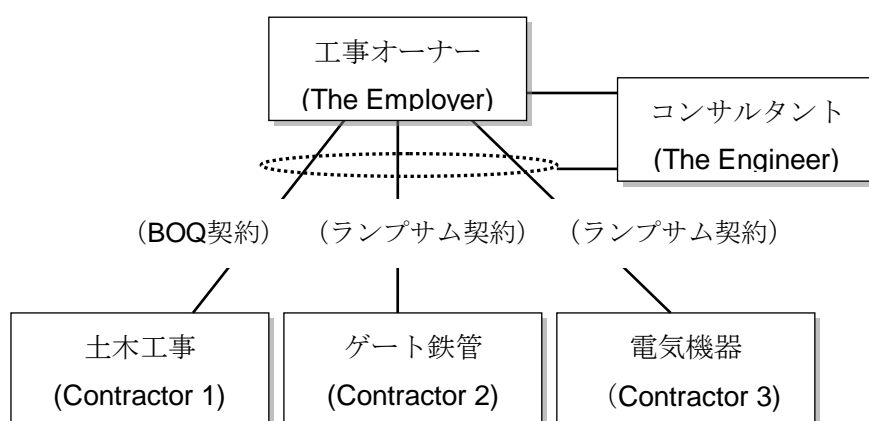


図 5.2.3 ケースプロジェクトの工事スキーム (ODA)

表 5.2.2 ケースプロジェクトの開発概要

項 目	内 容							摘 要
【一般事項】								
プロジェクト名	A 揚水発電プロジェクト							
所在地	タイ王国（バンコクより約 200km）							
設備容量	250MW× 4 ユニット 計 1,000MW 第 1 フェーズ（ユニット 1,2） 500MW 第 2 フェーズ（ユニット 3,4） 500MW							
発生電力の価値	ピーク電力供給を目的とし運転可能状態で月次定額							
【建 設】								
建設開始日	1995 年 1 月							
営業運転開始日	2000 年 1 月							
建設費		外貨		内貨		合計		
単位百万 US ドル	準備工事費	-		7.17		7.17		
(1995 年)	環境対策費	-		9.20		9.20		
	土木工事費	66.02		84.00		150.02		
	ゲート・鉄管購入費	37.56		22.52		60.08		
	電気機器購入費	149.53		29.93		179.46		
	送電線	21.07		9.66		30.73		
	オーナー管理費等	8.82		45.13		53.95	入札書類・エンジニアリング 通関費・輸入税含む	
		-						
	合計	283.00		207.62		490.62	予備費は解析のためここには含めていない。	
建設工程		95	96	97	98	99	00	
	準備工事	-----						
	土木工事		-----					
	ゲート・鉄管			-----				
	電気機器			-----				
	#1,2,3,4							
	送電線				-----			
設費年度展開(%)	(年)	95	96	97	98	99	00	
	外貨分	0.0	9.9	12.4	29.8	42.0	5.5	
	内貨分	1.8	10.2	16.3	42.8	26.6	2.3	
	合計額	0.8	10.1	14.1	35.3	35.5	4.2	
	(累積)	0.8	10.9	25.0	60.3	95.8	100	



土木工事の契約はFIDIC RedのBill of Quantities方式に従っており工事中の数量変化はエンジニア<sup>3</sup>の認定に従い精算が行われ、また建設中の労務費、資材費などの一次価格(市場価格)が建設期間中に変化することに対し、世銀が建設工事調達を対象に定めた標準入札書類[2]において(5.1)式のように規定されるように、単価の調整が行われた上で発電会社がコントラクターに支払う仕組みとなっている。この調整は直接工事費に対するものであり間接費への影響が処理できていないとの指摘は存在するが[3]、基本的に工事数量の施工中の変化と物価変動については発注者側のリスク負担となっている。

$$pn = A + b \frac{Ln}{L_0} + c \frac{Mn}{M_0} + d \frac{En}{E_0} + etc. \quad (5.1)$$

ここに  $pn$  は Bill of Quantities における特定の支払い工種に対する物価補正率を表わす。  $A$  は定数で調整しない部分の比率、  $b, c, d$  は労務費、資材費、機械費、その他の工事単価における比率、  $Ln, Mn, En$  は月次  $n$  におけるあらかじめ規定した統計シリーズにおける物価指数、  $L_0, M_0, E_0$  は基準月の物価指数である。また  $etc.$  項は上に述べた労務費などの他に考慮すべき項目を同様に操作した合計の比率で、  $A+b+c+d+etc.=1$  である。

さらに、操業中の OM 費用については発電会社の年次予算として確保されるものである。これらのことからわかるように、本事業のキャッシュフローは後述の BOT スキームと異なり事業着手前には必ずしも確定的ではない。また、単独事業会社たる SPC と異なり、発電会社全体の財務規模において建設費や OM 費のボラティリティは部分的な影響として吸収されるので、最終的にはあまねく国家財政あるいは電気料金によって回収されるメカニズムがある以上、必ずしも事業の事前確定性が求められるわけではない。

実際の建設は1990年1月に開始され1994年に2ユニットにより一部(500MW)営業運転開始しているが、途中、1997年のアジア通貨危機<sup>4</sup>などの影響により経済の一時的低迷から後半ユニットの運転スケジュールの見直しがあり現在、全号機の運転開始は未定である。今後、堅調な経済成長に伴い電力需要がさらに増加し、さらに増大する昼夜間

<sup>3</sup> FIDIC によって the Engineer として定義され、数量の認定や新単価の決定権限を持つ。

<sup>4</sup> 97年7月のタイ・バーツの切り下げを契機に、東アジア5カ国(タイ、マレーシア、フィリピン、インドネシア、韓国)の経済が大きな打撃を受けた。この金融・為替危機は、インドネシアの政権交代を招くなど、これらの国々の政治・経済に大きな影響を及ぼした[3]。

需要格差による電力系統全体の非効率解消のため 1,000MWの大型揚水発電所が完成していくものと考えられる。本研究においては、土木工事については既にほぼ完成していることから、このプロジェクトは実在のケースと見なして検討のベースとして使用するが、電気機器設備費などF/Sや実績から推定しつつ、著者による推定値が一部使用されている。

建設資金の調達には、土木工事に対して世界銀行 (IBRD) が、また機器類に対してOECS<sup>5</sup>が協調融資によって、タイ政府保証のもとにプロジェクト実施機関たる発電公社向けにローンを供与した。また内貨については発電公社が一定比率で拠出している。

### (3) PFI (BOT) スキーム

現実には公的開発プロジェクトであったが、世界的な電力セクターの民営化の流れを受けてタイでもIPPの導入が実施された。同様に本発電所がBOT事業として民間開発されたとして、この事業の持つ財務的リスクについて分析を行い、前項で述べた公的開発におけるリスク分担のソブリン性<sup>6</sup>と異なり、事業をとりまく民間会社や銀行にどのようなストレスがかかるかを調べる。

表 5.2.2 に示す建設費においては、F/S 時点に比べ、実際の契約金額は入札によりかなりの減額があり、より実績に近くすることを目的として資金供与金融機関の拠出実績等から著者が推定した金額に比例的に変更した。

図 5.2.3 に示すように、レンダーは途上国における国際ファイナンスの場合は民間銀行とともに公的金融機関、たとえば世銀グループのIFC<sup>7</sup>やわが国のJBICなど、あるいは日本のNEXI<sup>8</sup>などの貿易保険やJBIC保証、世銀保証[4]によってタイのカントリーリスクのカバーを行うことが前提となるが、計算上はレンダーや保証・保険機関についてはひとくくりの銀行ファイナンスとして扱う単純な構造としている。またスポンサーは通常、国内企業と外国企業がコンソーシアムでSPCを設立することが多いが、ここではスポンサー間の区別は行わないで、基本的に米国ドルベースで出資や配当が行われる前提としている。

電力の受給にかかる契約はPPA(Power Purchase Agreement)による。オフテーカー（発電公社）の信用リスクを十分減ずるためには政府による信用補完が必要であり、タイの

<sup>5</sup> The Overseas Economic Cooperation Fund の略で、1999 年に日本輸出入銀行と統合され現在は JBIC (Japan Bank for International Cooperation) となっている。途上国に円借款による開発ローンを供与した。

<sup>6</sup> 最終的にリスク顕在時の責任訴求先が政府になること。債務返済にかかるホスト国政府の信用リスクは本プロジェクトの場合公的資金供与を行った世銀や日本政府がとっている。

<sup>7</sup> International Finance Corporation の略。途上国向けの投融資を行う。

<sup>8</sup> Nippon Export Import Insurance の略。途上国向けのカントリーリスクをカバーする日本貿易保険。

場合は発電公社法(EGAT Act)によって、発電公社の債務履行はタイ国財務省が保証することと解釈されている<sup>9</sup>。タイ政府および発電公社が電力の支払い履行を実施しない、あるいは外国へ送金手続きに支障が発生する場合には、表 5.2.3 に示すようにタイ国政府に多くの資金供与を行っている日本政府や国際機関がタイ政府に履行を迫ることができる構造となっている。このような収入側の確実性が国際プロジェクトファイナンスには必要である。

表 5.2.3 タイ向け ODA ローン供与額(グロス)

金額単位：100 万 US ドル

年	1998	1999	2000	2001	2002
日本	624.2	1014.6	872.4	714.6	616.7
その他国	38.5	47.5	3.7	18.9	3.4
国際機関	－	273.5	－	－	－
合計	662.7	1335.6	876.1	733.5	620.1

出所：OECD DAC[5]

支出側においては、十分な技術力かつ財務的信用力を有するEPCコントラクターを選定し、ロット別契約ではなく完工にいたるすべての工事に最終責任をもって履行することが要求される。EPCコントラクターは自分の事業分野でない部門（建設会社にとっての電気機器製作・据付など、また逆も有り得る）は下請け(sub-contract)で専門会社に発注するが、EPCコントラクターと工事のオーナー（この場合SPC）との契約方式はEPCをとりまとめる代表会社1社とのターンキー契約が前提である<sup>10</sup>。

しかしながら、表 5.2.2 に示す地盤リスクを有する土木工事に相当する部分については、コントラクターがターンキーで受注した国際プロジェクトの実績は限られており（表 1.3 参照）、レンダーが合意するプロジェクトファイナンスを成立させるためには、コントラクターもしくはSPCの親会社であるスポンサーがそれらの会社の信用力を背景に完工保証を行うことをレンダーから求められる蓋然性が強い<sup>11</sup>。

契約通りに完工できるかどうか最も見通せるプレーヤーはコントラクターであるが、瑕疵担保責任の上限額がありレンダーが SPC の返済能力に不安を持つときはスポンサーにも保証を求めるケースがある。このような場合にも、「誰が」分担するかの前に「どのくらい」リスクがあるかを評価することが重要と考えられる。

<sup>9</sup> 著者が関係したタイにおけるプロジェクトに関して JBIC 担当者と打ち合わせた内容に基づく（EGAT 法第 45 条の解釈）。

<sup>10</sup> このような責任はしばしば single responsibility と呼ばれている。

<sup>11</sup> 著者が行った IFC における面談調査(2002 年 8 月, Washington D.C.)でもこうした傾向を確認している。

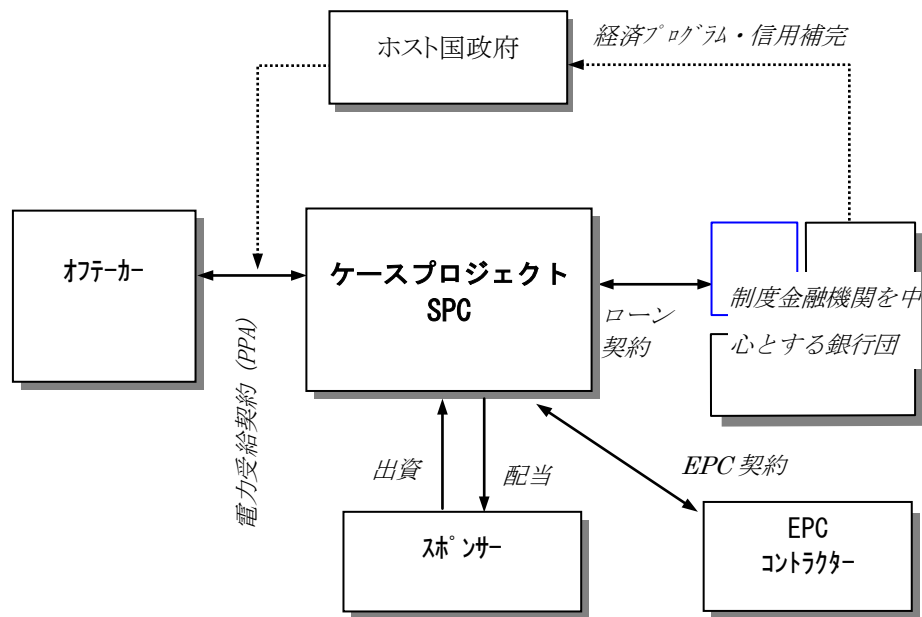


図 5.2.3 ケースプロジェクト（PFI）スキーム

## 5.3 キャッシュフローモデル

### 5.3.1 事業評価の前提条件

民間事業モデルとしてのケースプロジェクトの財務モデル（フィナンシャルモデル）は、SPCの貸借対照表、損益計算書、キャッシュフロー計算書の財務3表をコンピュータ上において複数の表計算シート（スプレッドシート）に構築したものであり、前提条件（入力値）の変更をすればただちに関連付けられたすべてのシートの値を再計算し表示するように作成されている。本フィナンシャルモデルは国際プロジェクトで広く通用している企業会計において用いられるGAAP<sup>12</sup>に準じている。また本研究で用いるフィナンシャルモデルにおいて地盤リスク等において確率分布を適用することなく、通常のプロジェクト事業評価と同様に、以降の仮定と前提に従った静態的な財務分析結果を表5.3.1に示す。なお本論文においては、種々の分析においてフィナンシャルモデルと称さず、キャッシュフローモデルと称する場合がある。これは会計上の関心よりも、出資者・銀行がプロジェクトへの参加を決める際に象徴的に必要とする事業IRRやDSCRが財務3表のうち、特にキャッシュフローモデル上で計算されるためである。3表は相互に関連しており、このような分析目的におけるモデルの呼称の問題であるので特段の支障は発生しない。

モデルには、為替レート（建設中、操業中）の値、着工1995年1月、完工・運転開始（Commercial Operation Date, COD）を2000年1月としたプロジェクトのスケジュール、事業期間30年、電力販売単価を6,500 USD/MW/月、自己資本比率30%、ローンの内外貨比率を1:1、EPCコストとして590.62 MUSD、減価償却を土木設備に対して30年、機械装置に対して15年の期間で定額法を適用しこれらの諸数値を前提とする。

OM(Operation and Maintenance)費は建設工事費1.5%を毎年支出している。また毎年の支出は物価上昇率を内外貨に対してそれぞれ年率5%および3%を見込んでいる。

消費者物価指数CPI(Consumer Price Index)はタイバーツおよび米国ドルに対して一定値としている。CPIも市場に委ねられるパラメータであるが図5.3.1に示すように1990年以来概ね単調な増加を示しているように、CPIの増加率は定数で与えることとした。なお、1999年付近でタイCPIの増加率に構造的な変化が見られるが本フィナンシャルモデルでは、これを与件的に扱うことはしていない。

---

<sup>12</sup> GAAP (Generally Accepted Accounting Principles)は一般に認められた会計原則として、米国のFASB (Financial Accounting Standards Board)が審議・決定し定期的に見直されている。

表 5.3.1 ケースプロジェクトのフィナンシャルモデル（仮定と結果）

### Case Project

#### General Assumptions and Summary Results

##### SCHEDULE

Finance Close, NTP	1-Jan-95	-
Construction Starts in	1995	-
Construction Period	60	months
COD	1-Jan-00	-
COD - Year ("COY")	2000	-
- Month ("COM")	1	-

##### REVENUE

Unit Contract Fee	US\$/MW	6,500	per month
Discounted at		0%	

##### AGREED COSTS

EPC Contract Cost	490,620	US\$ 000
CAPEX / EPC Cost Ratio	1.092	-
Agreed O&M Costs	30,000	US\$ 000
Agreed Operation Insurance Costs	200	US\$ 000

##### OTHER COST ITEMS

Contingency in Project Cost	0	US\$ 000
Contingency in Project Cost	0	Local 000
Drawn from month	55	

##### TAXES & RESERVES

Income Tax	40.00%	-
Tax on Dividends	25.00%	-
Import Duty Tax	0.00%	-
Value Added Tax (Construction/Operation)	0.00%	-
First Legal Reserve	5.00%	-
Max First Dividend as % of Equity	5.00%	-
Second Legal Reserve	10.00%	-

##### LOANS

Tenor	Years	12	grace(mo)	6
Interest Rate incl. upfront		8.00%		
(Upfront Fee)		( 1.50% )		
Interest During Const.(IDC)		10.00%		

##### SOURCES OF FUNDS

JBIC A US\$ OIC	\$375,876	70.00%
ECA	\$0	0.00%
Local Bank	\$0	0.00%
Equity	\$160,090	29.81%
Working capital	\$1,000	
	\$536,966	100.00% 99.81%

##### EPC CONTRACT

EPC Provided Cost @ Actual Rates		US\$ 000
US\$ Portion	490,620	US\$ 000
Yen Portion		Yen 000
Local Portion		Local 000
Taxes and Duties on EPC		Local 000
Forex Rate for EPC Conversion	100	Yen/US\$

##### ESCALATION & FOREX RATES

Local CPI rate	5.00%	/yr
US CPI rate	3.00%	/yr
Forex Local / US\$ @ FC	25.00	Local/US\$
Forex Yen/US\$ @ FC	100.00	Yen/US\$

##### PLANT FACILITY & OPERATION

Installed Capacity	1000	MW
Capacity for Revenue	950	MW
Years Operation	30	years
Average Availability Factor	95%	

##### SPONSORS RIGHTS

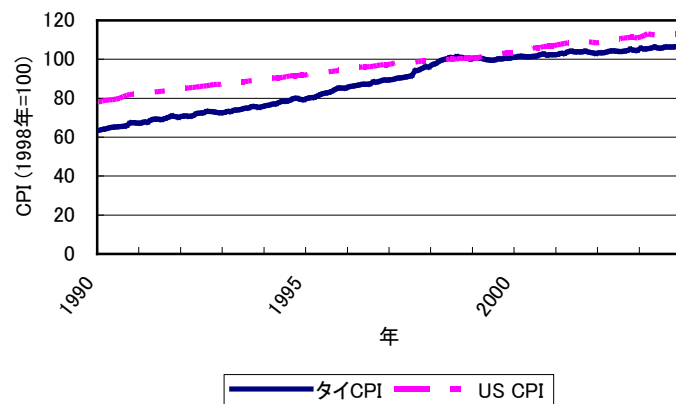
Sponsor	Investor	Premium	Investment	Dividend
Local			100.00%	100.00%
-			0.00%	0.00%
Offshore 1		0.00%	0.00%	0.00%
Offshore 2		0.00%	0.00%	0.00%

##### RETURNS

Internal Rate of Return	Equity	Project
AF COD 15 years	12.35%	6.90%
20 years	14.65%	9.06%
25 years	15.46%	10.01%
30 years	15.79%	10.47%
Average Debt Service Coverage Ratio	1.34	
Minimum Debt Service Coverage Ratio	1.23	
at year	12	

##### USES OF FUNDS (before COD)

EPC Contract (tax&duties)	\$490,620	91.54%
Development Phase	\$6,000	1.12%
Land Acquisition	\$0	0.00%
Owners' Costs	\$6,000	1.12%
IDC	\$30,000	5.60%
Other Financing Costs	\$3,346	0.62%
Contingency	\$0	0.00%
	\$535,966	100.00% 100.00%



出所：IMF-IFS[6]より著者作成

図 5.3.1 タイおよび米国の CPI

### 5.3.2 基本ケースの事業性

前項の前提に従い、またその他必要な設定を行いフィナンシャルモデルによる基本ケースの計算結果は表 5.3.1 に示す通り、プロジェクト内部収益率 (Project IRR) 10.47%、株主資本内部収益率 (Equity IRR) は 15.79% という結果を得ている。第 4 章で述べたような所定のハードルレートをクリアすればスポンサーにとって投資判断が可能となるが、建設コスト増嵩や金利によるリスクをハードルレートにプレミアムとして加算する必要があることを認識しなければならない。

また銀行へのローン返済の確実性の観点から最低 DSCR は 1.23 (平均 DSCR は 1.34) である。もし建設コストや金利が確定値であれば表 4.3.2 に示されるように DSCR の観点からの融資は、「途上国における IPP」というカテゴリーでは DSCR は 1.30 以上となっているが、本事業への電力料金の支払いが政府保証付き (国際制度金融カバー付き) で US ドル払いであると仮定すると為替リスクが回避され、英国・米国 PFI 同様によく整備された事業環境を前提に、1.23 でも融資交渉は可能であると考えられる。

## 5.4 工事費リスクのSPC財務への影響

### 5.4.1 検討する工事費リスクの範囲

プロジェクトにおける工事費のリスクファクターは多様である。特にコントラクターが現場において行うコストの管理においては、広義にはアドミニストレーション、スケジュール管理およびコスト管理[3]があり、そのすべてが工事費リスクへの対処であると言える。しかしながら、建設業における法律、制度や、FIDIC にもとづく工事契約、資金を提供する世界銀行などのガイドラインなど、従来多くの契約書類の実績と改良によって今日の建設工事が実施されている。

本研究では公的機関の事業から民間事業へのシフトに伴って生じる新たな問題点に焦点をあてることとして、FIDIC Red(数量精算契約)から FIDIC Silver(EPC ターンキー契約)に象徴されるように、予見できない自然リスクを問題とする。また、予見できない自然リスクとして工事中の異常な天候による風水害など偶発性の強いリスクの顕在については保険などによる救済があるものとし、「回避される工事費リスク」とみなすこととする。このようなリスクについても現実的には実際の被害と求償可能な額の差や、工事遅延に対する瑕疵担保責任額の欠け目等、工事オーナーにとって2次的にコスト増高する場合があるなど検討すべきことは多いと認識しつつも、地盤条件の変動の計量に重点を置く本研究における工事費リスクの対象とはしていない。

### 5.4.2 ケースプロジェクトの工事費

ケースプロジェクトにおいて、もともと土木工事以外はすべてランプサム契約によって基本的には建設コストは変化しない契約構造となっている。従って、建設コスト変動の中心的存在は土木工事である。土木工事においてさらに分解すると、明かり工事が主体となる上池、屋外変電所、放水口、道路工事、建築工事などは、厳密な意味で当然地質リスクを内包しており、当然、それに従って工事数量等の変更をきたし公共工事を想定すれば精算を行うことが多いが、事前の調査により基本的な地質や岩盤線が判明している場合は、経験あるコントラクターは精算無しでも一定の範囲で固定価格契約ができると本研究では仮定している。これらのことをふまえ、ケースプロジェクトにおいてフィジビリティスタディで設定した標準工事費を表 5.4.1 のように  $C_{mean}$  として、固定工事費( $C_{fix}$ )と標準支保工費( $C_{var}$ )に分解した。これらの関係は式(5.2)に表わされる。

$$C_{mean} = C_{fix} \text{ (固定工事費)} + C_{var} \text{ (標準支保工費)} \quad (5.2)$$



また、3.5.3 項においてはインディケータクリギングによって特定の地下構造物のみを対象として確率工事費を得たが、ここでは電気機器等すべての構築物・諸費用を足した全プロジェクト工事費を対象とする。全工事費の 90%信頼値を  $C_{90}^*$  とすると、 $C_{90}^*$  は式(5.3)で示すとおり  $C_{mean}$  に対して式(3.31)で定義した工事費増高リスク  $R$  (たとえば 90%非超過確率に対応するリスク量として  $R_{90}$  と表記する) を加えたものとして扱う。

$$C_{90}^* = C_{mean} + R_{90} \quad (5.3)$$

これらの関係を図 5.4.1 のように整理する。

### 5.4.3 工事費ボラティリティとフィナンシャルモデルの整合

3.4.2 項で述べた地下工事のボラティリティは、掘削時の地盤条件の変化が結果として支保の方法に影響し、それがコストの変動を規定する考えで表現されている。ここで厳密な表現をするならば、「掘削時の地盤条件の変化」ではなく「掘削の進行によって、もともと定まっていた地盤条件が判明し、その当初予想との差の変化」ということができる。極端な事例としてすべて無支保の工事費を下限値として、また用意した最大限の支保が全線にわたり必要になった場合を上限値としてコストが決まることを前提としている。その範囲内で実際の確率工事費が求められリスクカーブの規範に従うこととなる。また 3.4.2 項における検討で明らかになったようにインディケータクリギングで得られる工事費のボラティリティは正規分布と規定されているわけではなく、また、その偏差は上下対象ではない。従って、金融工学で頻繁に用いられる正規分布を前提としたダイナミックキャッシュフローとは異なり、上下限値を有するモデルによる工事費の確率分布の扱いとなる。

本ケースプロジェクトにおいてはリスクカーブの微分で得られる確率密度関数がスムーズでなく、また事前に予見的な分布型を規定することは必ずしも適切ではない。しかし、スプレッドシート上での計算過程は煩雑で非効率な作業となるため、図 5.4.1 でも示したように上下限を有しかつその間を線型で模擬した三角形分布を適用し、モンテカルロシミュレーションを用いたダイナミックキャッシュフロー計算を試みることにする。しかしこの手法はあくまでもリスクカーブの曲線形を忠実に反映したものではなく、将来、スプレッドシート計算のソフトウェアに工夫すべき課題を残す。

第 3 章で得たケースプロジェクトの工事費ボラティリティと本解析の関係を要約すると以下のようなものである。

①第 3 章で得た放水路と発電所の解析から得たボラティリティが、本章では同水路ト

ンネルや変圧器室空洞なども含めた、全地下工事に対するボラティリティであると仮定している。

- ②全地下工事の期待平均値の求め方は「最低支保工事費を算出し、それに推定ボラティリティ分を上乗せする」、「期待平均値を既知としてそこから上下のボラティリティを重畳する」などの方法もあり得るが、今回の解析においては、最低支保工事費が比較的容易に算出できたこと、最大支保工はすべての工事内容に対しあらためて設計数量を決める必要が発生するなど現実的に膨大な作業となることを勘案して、「期待平均値を既知 FS 作成者が見積もった予備費を除いた建設費（つまり経験的に見込んだ支保工量の含まれた額）が正しいと仮定し、支保工が重くなる方向（リスクサイド）について第3章で得た  $R_{90}$  を用いて、分布の決定を行うこととした。放水路トンネルと発電所空洞の期待平均支保と最低支保のギャップを、全地下工事のそれに適用することに疑問を持つからである。

また一般的な留意事項として地下構造物建設費のうち、支保変動費の確率的評価ができたとしても、プロジェクト全体における地下工事変動費の比率は相対的に小さくなる。プロジェクトの種類によって地下工事費が支配的な場合は確率分布の形は影響度が大きくより重要となる。

表 5.4.1 ケースプロジェクト構築物別工事費バラティリティ

金額単位：100 万 US ドル(1995 年)

	$C_{fix}$	$C_{var.}$	$C_{mean}$	摘 要
1. 準備工事	7.17	-	7.17	
2. 環境対策費	9.20	-	9.20	
3. 土木工事	132.21	17.81	150.02	$C_{var.}$ =支保工の FS 想定額(中央値)=17.81
3.1 仮設備・道路	7.93	-	7.93	
3.2 上部調整地	54.56	-	54.56	
3.3 水圧管路トンネル	9.68	1.47	11.15	取水口(2 基)含む 2 条,分岐管 部含む 周辺付帯トン ネル含む 2 条
3.4 発電所	16.46	13.47	29.93	合計 $C_{mean} = 95.64$ $V_{90}=12\%$ として $R_{90}=11.48$ $C^* = 490.6+11.5=502.1$ (百万ドル)
3.5 放水路トンネル	25.76	2.87	28.63	
3.6 屋外変電所	2.89	-	2.89	
3.7 放水口	12.36	-	12.36	
3.8 コントロール・管理ビル	2.57	-	2.57	
4. ゲート・鉄管類	60.08	-	60.08	
5. 発電機・タービン	179.47	-	179.47	付帯機器含む
6. 送電線	30.73	-	30.73	
7. その他	53.95	-	53.94	オーナー管理,設計・施工監理,機器輸入諸 掛・関税
合 計	472.81	17.81	490.62	

注：本コストは 1995 年ベースで内外貨をまとめて US ドルで整理している。また交換レートは 1USD= 24.9 Bahts で計算している。

略号の説明（図 5.4.1 と共通）

$C_{fix}$ ：構築物の変動要素を除く固定費

$C_{var}$ ：見積もり者が原契約 BOQ に含める期待平均変動費

$C_{mean}$ ：固定費に期待平均変動コスト  $C_{var}$  を上乗せしたコスト（期待平均コスト）

$C^*$ ：期待平均コスト周りのバラティリティ（ $V_{90}$ ）を加味したコスト

$C_{max}$ ：理論限界工事費（すべての支保を用意した最大コストによる方法で実施した場合）

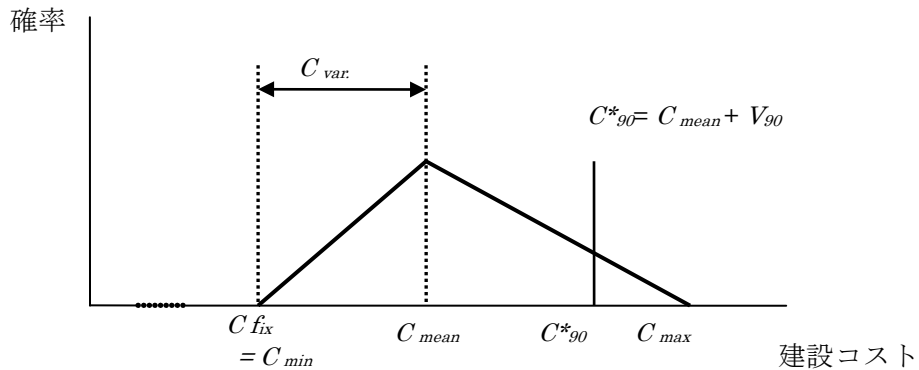


図 5.4.1 支保工費を確率分布とした建設コスト

#### 5.4.4 土木工事の変動リスクのレベル

表5.4.1で示す土木工事費においては、地下工事の工事費ボラティリティを検討するために、明かり土木工事や、地下であっても鉄筋、コンクリートなどの地盤性状に起因しない確定的数量が見込まれる、すなわち概ね通常の調査で工事費の見積もりを固定額で行える部分と、地下工事である水圧管路、地下空洞、放水路トンネルにおいて、PSアンカー、吹付けコンクリート、ロックボルト、スチールサポートなど支保工に要する金額を地質に依拠する変動費として扱っている。

本プロジェクトにおける工事費内訳から、そもそも土木工事の占める比率は全体の30.6%にとどまり、さらに支保工費の土木工事費、当該構築物（トンネル、地下空洞）費、全工事費に占める割合はそれぞれ、18.6%、11.9%、3.6%となる。事業評価を行う観点からは全工事費における対象リスクファクターのもたらすボラティリティを論じるべきである。支保工費のもたらすこの水準の変動の多寡について以下に考察する。

支保工の影響は一見大きくないように思えるが、電力インフラのような公共性の強い、さらに長期の安定性が期待されるような分野においては、そもそも参入者に対して十分な競争原理が作用するような事業環境が通常前提となっており、その収益率のレベルは基本的に当該国における経済成長の水準と大きく乖離することはないとすると、このようなボラティリティも投資リターンを計量しようとするプレーヤーにとってはクリティカルな水準の変動要因である。またケースプロジェクトがそうであるように、多くの土木工事を伴うインフラプロジェクトのサービス価格が十分な競争下で形成され、相当程度に長期安定性を目論む必要があると仮定すると、コストのうち変動費が相対的に小さい案件であっても十分な注意が払われるべきであり、かつ現実の問題としてこれだけの地下工事を含む土木工事ターンキー契約がほとんど見られないことから、リスク評価の重要な対象となることは明らかである。

当然、建設コストのボラティリティは、地下の地質条件以外にもその要因は多く考えられる。労務費や資材費の高騰（市場リスク）、許認可の遅れによる工程遅延（人為リスク、制度リスクなど）、建設時の異常な天候（自然リスク）、などがあげられる。市場リスクのうち物価指数変動については、サービス価格を物価指数に従い調整することによるパススルー<sup>13</sup>、許認可の遅れは開発権取得など開発者の、施工時に関する道路の一時占有などの許認可はコントラクターの、行政や地元対応能力に起因するなど、比較的分担者が明確である。また天災・不可抗力については土木工事保険による補償を予定するなど、これまでも種々のリスク対策が講じられてきた。

<sup>13</sup> リスク分担を他のプレーヤーに転嫁する契約構造をとること。

#### 5.4.5 地質条件要因によるコスト変動確率分布

3.5.4(2)項で述べた放水路トンネルおよび発電所空洞工事費のもつボラティリティ  $V_{90}$  は 12%であったが、これを水圧管路トンネルも含めた変動費を有する地下工事全体のボラティリティとして検討を進める。前項までの検討で、第3章で得られたケースプロジェクトの地下工事起因の工事費変動を示す確率分布を規定する上で既知となった数値・情報は以下の通りである（図 5.4.1 参照）。

- 期待平均値 ( $C_{mean}$ ) = 490.62 ( $10^6$  USD)
- 最低工事費 ( $C_{fix}$ ) = 472.81 ( $10^6$  USD)
- ボラティリティ ( $V_{90}$ ) = 12 (%)
- 90%信頼ダウンサイド（コスト増嵩側）工事費  
=  $R_{90}$  = 11.48 ( $10^6$  USD)

なお  $R_{90}$  値は、第3章で検討したインディケータクリギングにおいて、放水路トンネルおよび発電所空洞で構成される地下構築物をひとつのプロジェクトとしてみた場合にボラティリティ ( $V_{90}$ ) として 12(%)を得たが、これをケースプロジェクト全体に適用するため、表 5.3.1 内に示したように他の地下構築物全体額に換算したものである。

以上を満たすような確率分布が次節以降で実施するダイナミックキャッシュフローモデルによるモンテカルロシミュレーションに使用することができる。以上のように、3.4.3 項で定義したボラティリティ  $V$  を用いることによって、財務的分析を確率的に行える手法が開発されることになる。

ただし、BOQ 契約を前提にした工事費見積もりで定義する期待平均値としたことについては、見積もり者の標準的な支保量推定がいかなる規範に基づいているかの検証が要求されることとなる。この問題については解析後の考察として後述することとする。

#### 5.4.6 ダイナミックキャッシュフローモデル

5.3 節で示したキャッシュフローモデルを前提として、特定の仮定パラメータを確率分布として与え、十分な試行回数を与えたモンテカルロシミュレーションをキャッシュフローモデル上で実施し、目的パラメータとする、Project IRR, Equity IRR, 最小 DSCR を確率分布として求めることとする。このモデルは第6章においてさらに、金利などの変動要素を含めて解析に用いるが、本章においては地質要因で変動する EPC コストだけを確率分布として与えた。

## 5.5 解析結果と考察

### 5.5.1 解析結果

前節までに準備した条件によってダイナミックキャッシュフロー計算を行った結果を表 5.5.1、図 5.5.1、図 5.5.2 および図 5.5.3 に示す。これらは Project IRR, Equity IRR および DSCR の確率分布の観点からまとめられている。

表 5.5.1 キャッシュフロー分析の結果(地質リスク起因)

条 件	Project IRR	Equity IRR	Min. DSCR
期待平均値	10.48 %	15.79 %	1.23
最小値	9.40 %	13.94 %	1.11
最大値	11.71 %	17.95 %	1.39
標準偏差(%)	0.47 %	0.83 %	0.06

表 5.5.1 に示すように、本ケースプロジェクトの地下工事の支保工変更による工事費リスクの顕在時の事業者・銀行が共通してプロジェクトの経済性の判断材料として用いる Project IRR への影響は期待平均値で 10.48 % であり、ボラティリティ（標準偏差相当）は 0.47 % である。また、株主資本収益率は期待平均値 15.79 % を中心に標準偏差 0.83 % で変動する。さらに DSCR は期待平均値 1.23 まわりで最小値 1.11 であり最大リスク顕在時で 0.12 のダウンサイドとなっている。最小 DSCR を厳密に考えるならば 1.11 があらたな最小値ともいえ銀行からみれば看過できない値となってくる。しかし、ここでは DSCR 自身が分布で表わされており、銀行からみればいかなるリスクを有する資産（ローン債権）であるかを確率的に把握することができ、ALM にみられるような銀行資産の確率的に計量可能なポートフォリオのひとつと位置づけられるようになった。

これらの数値の多寡については、本事業の他の収入・支出の変動要因、スポンサーの投資基準が要求する精度とともに論じられる必要があり第 6 章に委ねるが、地質に起因するケースプロジェクトの地下工事費の変動リスク、すなわち支保工費の変動リスク、がプロジェクト全体の事業性に与える影響を以上のように計量することができた。

### 5.5.2 考察

#### (1) 事業者の評価

一般的に事業者は SPC に投下した資本に対してどれだけのリターンがあるかに基本的な関心を寄せる。第 4 章で述べたとおり Equity IRR が、SPC の所要資本調達コストを上回る必要がある。仮にこの投資を行う外国のスポンサー会社が SPC の株主資本を提

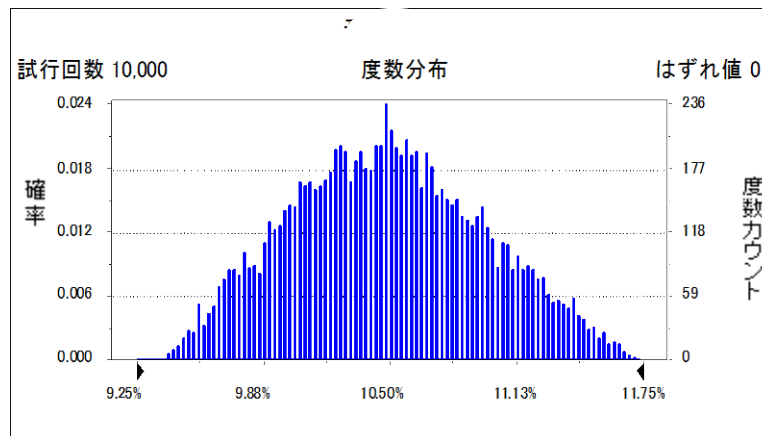


図 5.5.1 Project IRR の分布

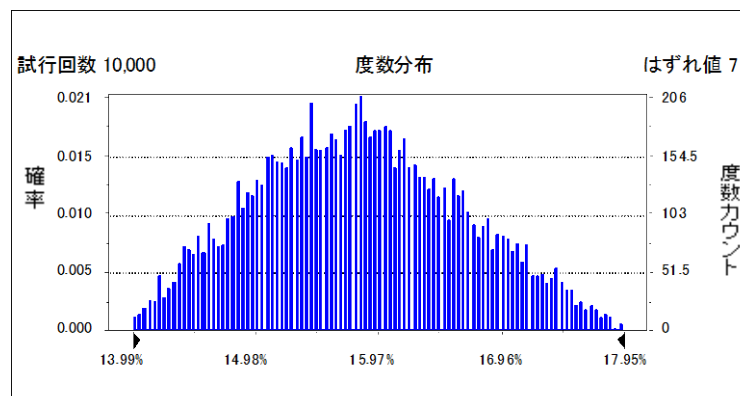


図 5.5.2 Equity IRR の分布

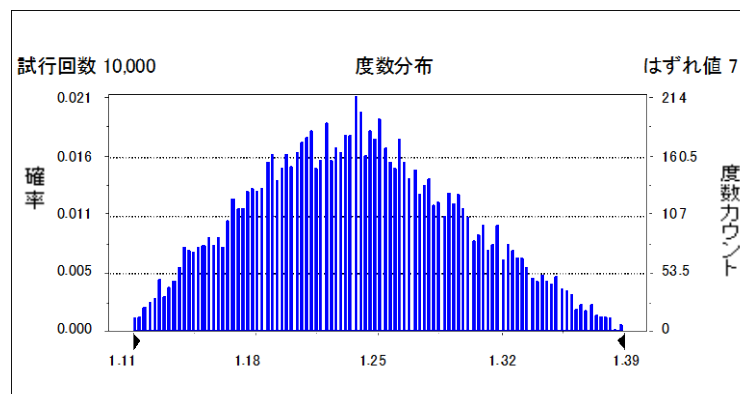


図 5.5.3 DSCR の分布

供するとして、式(4.5)に電力業界が株式市場で比較的安定していることを考慮し  $\beta=0.5$ , 1995 年時点におけるタイの平均株主リターンを  $E(r_0)$  ( $=10\%$ ), リスクフリーレートとしてタイ国債 (30 年) のレート ( $=5\%$ ) を採用し, 得られる株主資本コストは式(5.4)のように  $6.5\%$  と計算される. また SPC の資金調達コストは式(5.5)のごとく, 税率  $t(=40\%)$ , 負債比率  $D$  および株主資本比率  $E$  を  $7:3$  とし, 負債コスト  $K_D$  を表 4.4.1 で示したケースプロジェクトへのローン金利を固定金利として  $6.5\%$ , 式(5.4)による株主資本コスト  $K_E$  すなわち  $E(r)$  を  $6.5\%$  として, 結果として加重平均 (WACC)  $6.5\%$  をうる.

$$\begin{aligned} E(r) &= r_f + \frac{E(r_M) - r_f}{\sigma_M} \sigma \\ &= r_f + \beta(E(r_M) - r_f) = 6.5\% \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$WACC = (1-t)K_D \frac{D}{D+E} + K_E \frac{E}{D+E} \quad (5.5)$$

この値に対し出資を検討する事業者は, 自らの戦略, 個別のリスク認識, 経営の工夫によるリターンの増嵩分などを考慮して独自のハードルレートを作成するが, 表 5.5.1 で示した出資リターンの最小値  $13.94\%$  は, 上記の個別修正を含める余地を十分残しており, 出資を肯定できる可能性を十分に有していると判断できる.

## (2) 銀行の評価

DSCR の最尤値が  $1.23$  であり, 従来のキャッシュフロー分析による確定的な値であれば表 4.3.2 の参考値に照らすと, 途上国で為替リスクありとする場合の  $1.30$  に及ばず, 先進国で為替リスクなしの場合の  $1.20$  以上に該当し微妙な状況であり, 最低 DSCR が  $1.11$  であるためさらに保守的スタンスに立てば要注意案件となる. しかし 5.5.1 項でも述べたとおり, 従来の確定的な値によるのではなく本 DSCR は確率分布として与えられており, 銀行自らの資産ポートフォリオに加えたときのリスクが計量されており, 銀行が営業戦略上この案件にプロジェクトファイナンスを行うかどうかの判断を容易にしているといえる.

なお, 本ケースプロジェクトでは三角形分布で工事費変動が仮定されたため, 種々の解析のアウトプット数値においても最小値が存在するが, 仮に下限値を持たない分布形で仮定パラメータの確率密度関数が与えられた場合には DSCR の最小値も存在しないことになる. このようなときに有意水準として  $\sigma$  や  $2\sigma$  などにおける DSCR の非超過確



率を知ることができ、土木工事を多量に含むプロジェクトへのより戦略的なローン抛出の意思決定に寄与すると考えられる。

銀行が不確実なキャッシュフローを前提にリミテッドリコースローンを抛出する事例として風力発電における風況変動がある [7]。この事例では風況評価は図 5.5.4 のような確率分布で与えられており、平均風速から標準偏差分を差し引いた 5.9 m/s の風速によってもたらされる事業収入を前提に返済が確実と判断されれば良いとされている。この事例からも、地盤リスクも確率標記されたコスト変動の問題ととらえられれば、リミテッド（もしくはノン）リコースローンによるプロジェクトファイナンスの対象プロジェクトとして扱われる可能性を示唆している。

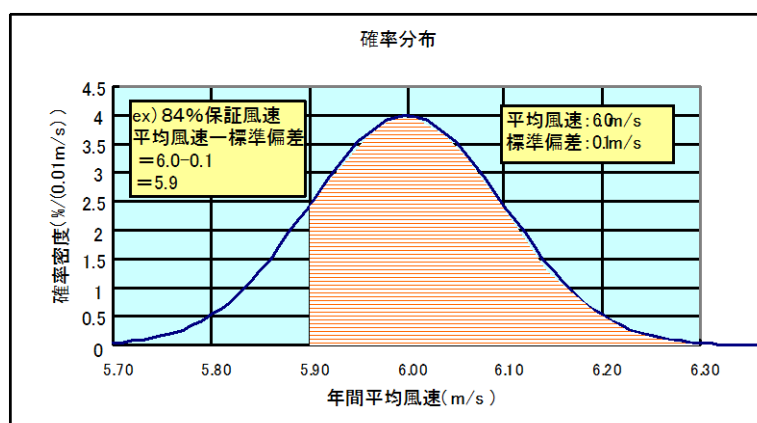


図 5.5.4 確率的事業評価の事例（風力発電）

### (3) 総合評価

上記のごとく単独のリスクファクターとして地盤リスクの出資や融資評価への影響を示すことができたが、他の事業リスクファクターとの組み合わせた同時確率的な全体としてのキャッシュフローリスクの計量が必要がある。この観点から第 6 章においてプロジェクトの総合的なリスクレベルの検証と事業判断について事業キャッシュフローモデル上でモンテカルロシミュレーションを用いた検討を行うこととする。

土木工事以外に建設コストを持つプロジェクトの総合的なリスクレベルの検討においては、地盤リスクの影響は、そもそもの工事費に閉める土木工事費の比率に応じて限定的であるが、地質条件に左右される地下構造物がどの程度含まれるかによって、建設費のボラティリティは大きく変わってくる。たとえばトンネル・地下空洞を有する水力発電事業、トンネルを有する鉄道・有料道路事業、トンネルを有する水道事業、地下空間

を有する都市開発事業など、事業によって、また地点特性によって地下工事費のプロジェクトコストに占める割合は異なる。

地質条件の変動による大きな建設費全体の変動が仮にあるとして、図5.5.5に示す概念からわかるように、ボラティリティが大きくなる場合、当然DSCRもEquity IRRも減じプロジェクトファイナンスによる融資が不可能になることが有りうる。しかし、このような限界を知るためにも変動を知ることは重要である。

すなわち、地質要因によって工事費が変動する大規模土木工事を含む民間事業であっても、地質条件という自然リスクそのものが民間負担であるからと事業を棄却すべきとする判断には直ちには繋がらないと言え、また事前に評価される土木工事費のボラティリティが民間企業の出資や銀行融資に耐えられない場合には、公的な開発を検討すべき案件であると言える。このような判断のためにも地盤条件の確率的計量は重要であると言える。

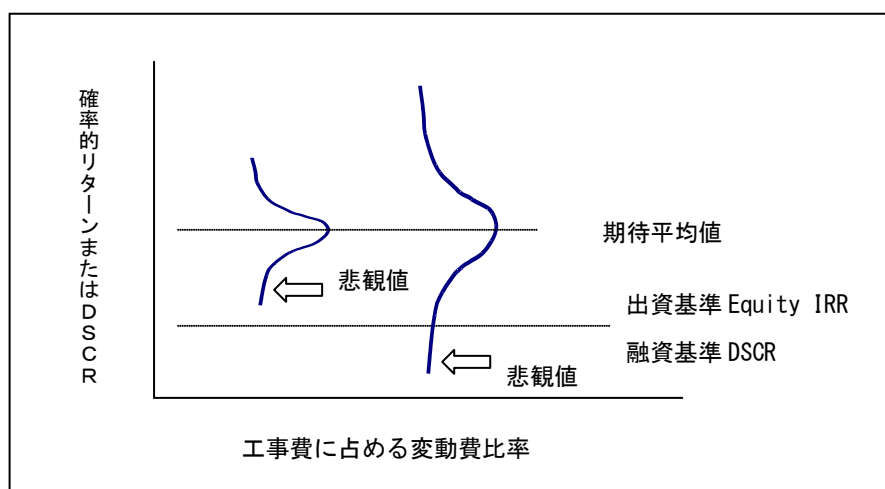


図 5.5.5 出資および融資の基準と確率的リターンおよびDSCRの関係

## 5.6 結 語

本章においてケースプロジェクトを実在の揚水式水力発電事業に基づき設定し、第3章で得られた地盤リスクによる工事費ボラティリティをキャッシュフローに基づく事業評価の観点から考察した。本章におけるまとめは以下の通りである。

- ①ケースプロジェクトをタイ国における揚水発電所(出力 1,000MW)と設定し、フィージビリティスタディに基づく工事費を用いてキャッシュフロー分析を行った。地質変化の顕在に伴う支保パターンの不確実性による工事費変動は、総工事費 490.62 MUSD<sup>14</sup>の中に 17.81 MUSDが標準として含まれている。
- ②支保工費の変動特性は第3章で得たインディケータクリギングによる確率評価に基づく放水路トンネル、地下発電所空洞を代表とする地盤条件に起因する地下工事の工事費変動の確率関数を最尤値、最低工事費、ボラティリティ  $V_{90}$  をもとに悲観値を与えることによってあらためて確率分布（3 角形分布）として定義し、民間企業や銀行がプロジェクトの事業性を評価する場合のダイナミックキャッシュフローモデルに入力可能とし、同モデル上でモンテカルロシミュレーションによって地盤リスクがプロジェクトの事業性に及ぼしうる影響をEquity IRRおよびDSCRを確率的出力パラメータとして得る手法を開発した。
- ③ケースプロジェクトはトンネルや地下空洞を多用する大規模土木工事を含む事業であり、地下の地盤条件が確定していなくても民間企業による出資と銀行によるプロジェクトファイナンス融資の適用を十分に検討できることを、第4章で検討したプロジェクト事業評価の手法に従って示した。ただし地点特性によって地下工事費のプロジェクトコストに占める割合はそれぞれケースプロジェクトとは異なるため、その工事費のボラティリティが融資・投資の判断に大きく影響することはあり得る。その場合でも、本研究で示したようにキャッシュフローモデルに地下工事費のボラティリティを入力することにより、Equity IRR およびDSCR を確率的に評価すれば、民間企業および銀行による出資・融資の限界を知ることができる。

---

<sup>14</sup> Millions of US Dollars. 百万米国ドル。

④このことから、PFI による民間開発と潜在リスク（ボラティリティ）の大きさから、公的開発の合理性を客観評価できる手法でもある。

なお、本章における研究は第 6 章で行う建設工事費リスクの SPC への財務的影響について、金融等の市場リスクと比較的あるいは総合的な検討の一部をなす予備的なものである。

## 参考文献

- [1] Japan International Cooperation Agency : Kingdom of Thailand, Feasibility Study on Lam Ta Khong Pumped Storage Development Project, Final Report, 1991.
- [2] Standard Bidding Documents - Procurement of Works, The World Bank, 2000.
- [3] 草柳俊二:21 世紀型建設産業の理論と実践－国際建設プロジェクトのマネジメント技術, 山海堂, pp.82-147, 2001.
- [4] Gupta P., Lamech R., Mazhar F. and Wright J. : Mitigating Regulatory Risk for Distribution Privatization – The World Bank, Partial Risk Guarantee, Energy & Mining Sector Board, Discussion Paper series, Paper No.5, The World Bank, 2002.
- [5] Geographical Distribution of Financial Flows to Aid Recipients, 1993-2003, OECD, 2005.
- [6] IMF : International Financial Statistics, May, 2005.
- [7] 風力発電導入ガイドブック, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, pp.22-23, 2000.

## 第6章 建設リスクおよび市場性リスクを有するプロジェクトの総合事業評価に関する研究

### 6.1 緒言

地盤リスクの定量確率表現とプロジェクトの事業性への影響について第5章で検討した。本章では同じ民間 BOT 事業として設定したケースプロジェクトにおいて、第4章で指摘したように、地盤リスク以外にも事業はその終了までの期間中に各種の事業リスクに晒されるため、このようなインフラ事業が本来的に包含するリスクについて総合的に検討することとする。ここでは開発途上国における投融資環境に焦点をあて、特に制度で事業性のボラティリティを抑制しなければならない事項について第4章で示した事業評価プロセスにおいてその影響を検討する。また、各種ボラティリティを含む事業評価として、共通のダイナミックキャッシュフロー上で第5章において得た地盤リスクと、本章で計量を試みる金利リスクの影響をはじめとしたそれぞれのリスクの事業性への影響を比較的な立場で検討する。このことによって、従来、財務専門家と建設技術者が別々に抱えてきた建設プロジェクトに対するリスク認識について、同一のモデル上でプロジェクトのリスクとリターンを計量的に評価できることになる。

また本論文ではここまでに、リスクの計量化に焦点をあてて検討を進めてきたが、本章においてあらためて、計量化できない、あるいは今後その必要性がある項目を整理する。

ここまでの本研究では、これまでに確率量として計量的な検討が従来なされてこなかったプロジェクトへの地盤リスク(工学的リスク)や市場リスクについて、これらをダイナミックキャッシュフロー上で分析するための手法を提示すること、また地盤リスクを含め、確率量として与えた複数のリスクパラメータの事業性への影響度を同時に計測する手法の提案が主題をなしてきた。第5章で検討したケースプロジェクトのような電力プロジェクト以外においても、有料道路やその他土木工事によって大きな資産を形成する事業において、建設リスク、経済指標の市場リスク、天候リスク、交通量変動などによる収入リスク、など広範なリスク分析をキャッシュフロー上で検討することによって、建設技術者がプロジェクトの財務的事業評価に直接参加するきっかけを深めることが

できる。

従来から公共事業などにおいてプロジェクトの経済的側面について建設技術者が役割を果たしてきたが、ここで述べる財務的事業評価とはあくまでも主体が第3セクターや特殊法人、あるいはBOTにおけるSPCであれ、企業財務としての意思決定をしなければならない場合を論じている。その評価は当該会社の財務的安定性、換言すれば投資回収性について厳しくチェックされなければならないからである。

本章では、第5章で検討したケースプロジェクトについて、地盤リスク以外のリスクについてもその事業性への影響度を計量的に分析する。これによって、地盤リスクの影響を第5章で論じたよりも、さらに他のリスクと比較的に考察することが可能となる。

特に金融工学の発展によって可能となった計量化リスクとしての金利のボラティリティ評価においては、第2章において述べたように、マルコフ過程をベースとしたマートンモデル[1]に始まる連続確率過程モデルがこれまでに多くの研究者により開発されており、その特性に言及した上で適切なモデルを用いて、金利データについてはケースプロジェクトが仮に現実であれば適用されたであろう水準を、調査に基づき設定し検討した。データは既に2003年までの現実のパスが明らかになっており事後的ながらそのボラティリティ評価について振り返ることができる。

最後に、このような地盤リスクと金利リスクの比較論において、地盤工学に立ちかえてそのリスクマネジメントの可能性について知識の抽出を図る。また、地盤リスクは誰が如何なる条件で負担すべきか、ケースプロジェクトにおける事業資産のもつリスク特性と民間の事業投資モチベーションの観点から、計量的な考察を行う。

## 6.2 事業評価において財務的影響のあるリスクファクター

### 6.2.1 分析対象とするリスクの構成

第4章で述べた BIS による金融機関向けの資産リスクにおけるリスク整理と対比しつつ、ケースプロジェクトの諸リスクを以下のような分類に再整理する。

- ① 取引先や国の義務履行の健全性に関する信用リスク
- ② 電力マーケットや各種金融指標など市場性リスク
- ③ 建設リスク（表 4.2.1 で示すオペレーションリスクのうち個別リスクに相当）
- ④ その他個別リスク

表 6.2.1 ケースプロジェクトリスクの分担者および対策

主なリスク項目	リスク分担者	リスク特性	分類
開発段階			
開発権・事業権取得	スポンサー		①
土地取得(住民移転含む)	スポンサー、ホスト国政府		
各種許認可	スポンサー、ホスト国政府		
反対運動	スポンサー、ホスト国政府		
開発費用・期間	スポンサー	サイト特性による開発費用や調査量，開発期間の変動，事業決定至るまでの費用・期間。	④
建設段階			
EPC コントラクター信用リスク	スポンサー、レンダー	EPC コントラクター債務放棄	①
地質・地盤	EPC コントラクター，スポンサー，保険会社，ホスト国政府	予見性のレベル，契約により分担割合変化	③
設計瑕疵	EPC コントラクター	EPC コントラクターの建設マネジメントリスク	③
建設・完工遅延	EPC コントラクター		①
コストオーバーラン	EPC コントラクター，スポンサー（EPC 事由外）	予見外条件，スポンサーの途中変更要求など	③
操業段階			
販売電力マーケットリスク(量)	オフテーカー	当該サービス市場リスク	②
販売電力マーケットリスク(価格)	スポンサー，オフテーカー	燃料市場価格履行リスク	②
事業期間終了時売却価値	スポンサー	事業資産の市場価値	②
建設・操業段階共通			
カントリーリスク	スポンサー	為替市場のボラティリティ	①
為替変動	スポンサー，EPC コントラクター，オフテーカー，金融機関		②
物価・労賃上昇	スポンサー，EPC コントラクター	マクロ経済と関連	②
利子率変動	レンダー，スポンサー，EPC コントラクター	金融市場でのボラティリティ	②

出所：著者まとめ

略号：LD（瑕疵担保責任, Liquidated Damage）



このうち開発段階におき得るリスクについては資金調達が本格化しておらず、その終盤までは基本的に銀行によるローンの検討段階ではない。従って本章における計量的な検討課題として除外する。また、建設段階におけるリスクについては既に検討した地盤条件による工事費変動リスクの影響分析の他、種々のリスクの発現は往々にして工事の中断、完工遅延という結果を招くことから、完工遅延について感度分析を行うこととする。ただし遅延によるオフテーカーによるペナルティーについては考慮対象外とする。

操業段階におけるリスクのうち販売電力量および価格についてはケースプロジェクトが揚水発電所として、石油・ガス燃料市場価格に大きく左右される電力エネルギー供給の市場価格ではなく、需給バランスの調整と電氣的系統安定性のための定性的価値に鑑みて支払い価格が決定される性格を有することから本研究における事業性への計量的影響評価としては不適であるが、電力のサービス価格レベルについて一定の範囲で感度を調べることにする。

建設および操業段階の共通事項としてのカントリーリスクについては、投融資に関する法整備が大前提であり、プロジェクトファイナンス成立のための諸条件について第4章で述べた。ここではそうした事業環境の成否の問題にとらえ、計量的分析の対象外とする。為替変動はEPCコストにおいて内貨（パーツ）とドルの為替レートが変動することにより事業性が変化する。交換レートは1997年の為替危機を境にそのヒストリカルはジャンプ現象を見せている。換言すれば経済政策上の意図によって為替がジャンプしているため、連続的なヒストリカル分析には基本的になじまない。従って、ここでは確定値による感度分析の問題にとらえる。また物価・賃銀変動については図5.3.1に示すように、タイにおいて概ね単調な増加傾向をたどっていること、また米国の消費者物価指数CPIのヒストリカルも単調な増加を示していることから、本件では為替同様にマルコフ過程による模擬ではなく消費者物価の増加率の感度分析とする。最後にローン金利の変動についてはブラック・ショールズモデルを基点として金融工学によってその評価手法が検討されてきた各種の変動モデルを検討する。また、これら経済指標のあいだには多重共線性の問題があると従来から指摘されている。しかし本検討では、金利以外を確定値による感度分析としたことも含め、この問題については地盤リスクと他のリスクの量的比較に重きをおく目的から、経済指標間の多重共線性に関しては検討対象外とする。

以上のように、ケースプロジェクトにおいてその事業性評価のために検討すべき計量的リスク課題を下線で示した6項目とし、ダイナミックキャッシュフローモデルに入力すべき内容をあらためて表6.2.2に整理する。

表 6.2.2 ケースプロジェクトのリスク計量分析内容

リスクファクター	入力形式	確率モデルまたは変動範囲	説明箇所
地盤起因工事費リスク	確率値	インディケータークリギング	第3章および第5章
完工遅延	確定値	1年間の工事中断	
サービス価格レベル	確定値	6,500 USD/mo/kW $\pm$ 10%	
為替レート	確定値	1 USD = 25 および 45 Bahts	図 4.3.4
消費者物価指数	確定値	US CPI=1.4% Thai CPI=2.0%	図 5.3.1
ローン変動金利	確率値	各種ブラックショールズモデル	本章 6.2.4 項

## 6.2.2 分析モデルの前提条件

各リスクファクターの影響を調べるためのキャッシュフローモデルは第5章で用いたものを基本ケースとして使用する。従って、そこで仮定されたプロジェクトの諸データについてはそのまま本章の検討において準用している。また、たとえば法定準備金や負債返済準備金から発生する収入としての金利の扱いや、株主が短期資金を供給することによって得られる SPC の財務効率の更なる向上など、モデル上で実務的に考慮すべき詳細な事項は数多く考えられるが、研究の目的に照らしてこれらは捨象している。

各種のリスクを同一モデル上でパラメトリック分析もしくは確率分析として、後述するケース分けに従って入力し、リスク合成された状態でキャッシュフロー分析を行い、その結果として、第5章同様、Equity IRR および DSCR を評価対象パラメータとして出力する。また、前項で整理した個々のリスクファクターの分析結果への寄与度を比較分析するために、トルネードチャートを作成する。

## 6.2.3 地盤起因工事費リスクの扱い

単独のリスクファクターとしての地盤リスクのモデルへの入力については、第5章で検討した内容をそのまま準用する。

## 6.2.4 変動金利の検討

### (1) 変動金利のモデル化

前項で述べた算術ブラウンモデル、幾何ブラウンモデル、および対数平均回帰モデルについて検証を行う。あらためて各モデル化の過程を以下に整理する。ある時刻（ここでは月） $t$  における LIBOR やある国の地場金利の水準を  $S_t$  と標記することとし、マートンモデル（算術ブラウンモデル）、GBM（幾何ブラウンモデル）、対数平均回帰モデルの順で再整理する。

### (算術ブラウンモデル)

金利の変化率は時間依存の平均変化率 $\mu$ に標準偏差 $\sigma$ の正規分布によって支配されるとブラウン運動による変化を付加したモデルとして式(6.1)によって表わされる.

$$dSt / St = \mu dt + \sigma dZt \quad (6.1)$$

ここに $\mu$ は長期トレンドの傾き, $\sigma$ はヒストリカルデータの持つ標準偏差である. $dZt$ はドリフト増分を表す. このモデルの場合には第2項の試行パス次第で金利がマイナスにもなりやすいという欠点が一般的に指摘されている.

### (幾何ブラウンモデル)

算術ブラウンモデルに対して金利水準の対数が標準偏差 $\sigma$ のブラウン運動に支配されると定義し, 金利の変化がより抑制された規範に従うモデルとして幾何ブラウンモデルが使用されることが多い[3]. いま金利の対数を $f(S,t)$ として,

$$f(S,t) = \ln St . \quad (6.2)$$

簡便のため式(6.2)の左辺を $f$ ,  $St$ を $S$ と標記し, その $S$ まわりの第1階, 第2階の導関数を式(6.3)にて準備する.

$$\frac{\partial f}{\partial S} = S^{-1}, \frac{\partial^2 f}{\partial S^2} = S^{-2} \quad (6.3)$$

金利の対数の変化率 $df$ を式(6.3)に準じて整理すると式(6.6)で表される.

$$\begin{aligned} df &= \left( \frac{\partial f}{\partial S} \cdot \mu S + \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial S^2} \cdot \sigma^2 S^2 \right) dt + \frac{\partial f}{\partial S} \sigma S dZ \\ &= \left( \mu - \frac{1}{2} \sigma^2 \right) dt + \sigma dZ \end{aligned} \quad (6.4)$$

### (対数平均回帰モデルの分布形)

前項で述べた Ornstein-Uhlenbeck 過程 (Vasicek モデル) を導出する. このモデルにおいては平均回帰性を持たせるための工夫を施し, いま原データ (ここでは月次金利) の価格を  $S_t$  として,  $S_t$  の対数の収束値  $\theta$  からの差が時間とともに  $\kappa$  の速度で累積するモデルとして式(6.5)で表される.

$$dS_t / S_t = \kappa(\theta - \ln S_t)dt + \sigma dW_t \quad (6.5)$$

いま, 式(6.6)を定義し, Ito の Lemma, すなわち式(6.7)を用いる.

$$Z_t = \ln S_t \quad (6.6)$$

$$dZ_t = \left(\mu - \frac{1}{2}\sigma^2\right)dt + \sigma dW_t \quad (6.7)$$

$\mu$  が長期トレンドとして式(6.5)における右辺第 1 項の係数であるとする, 式(6.7)は式(6.8)のように表現される.

$$dZ_t = \left\{ \kappa(\theta - Z_t) - \frac{1}{2}\sigma^2 \right\} dt + \sigma dW_t \quad (6.8)$$

ここに式(6.9)に示すように, あるデータ  $Y_t$  が定数  $\kappa$  の速度で自然減衰した値が  $\ln S_t$  すなわち  $Z_t$  であるとする.

$$Y_t = e^{\kappa t} Z_t \quad (6.9)$$

この微分は式(6.10)で与えられる.

$$\begin{aligned} dY_t &= \kappa e^{\kappa t} Z_t dt + dZ_t \\ &= \kappa \left( \theta - \frac{1}{2\kappa} \sigma^2 \right) e^{\kappa t} dt + \sigma dW_t \end{aligned} \quad (6.10)$$

時刻  $t$  における  $Y_t$  の増分  $dY_t$  は正規分布に従う. 将来時刻  $T$  における  $Y_t$  の期待平均と標準偏差は式(6.11)のごとく与えられる.

$$Y_t \sim N \left[ Y_t + \left( \theta - \frac{1}{2\kappa} \sigma^2 \right) (1 - e^{-\kappa(T-t)}), \sigma \sqrt{\frac{e^{2\kappa T} - e^{-2\kappa(T-t)}}{2\kappa}} \right] \quad (6.11)$$

また式(6.6)および式(6.9)より現データの対数である  $Z_t$  で式(6.11)を表現し直すと式(6.12)を得る.

$$Z_t \sim N \left[ e^{-\kappa(T-t)} Z_t + \left( \theta - \frac{1}{2\kappa} \sigma^2 \right) (1 - e^{-\kappa(T-t)}), \sigma \sqrt{\frac{1 - e^{-2\kappa(T-t)}}{2\kappa}} \right] \quad (6.12)$$

## (2) ケースプロジェクトにおける変動金利ボラティリティ

ケースプロジェクトのために 1995 年にローンを組成するとして、それまでのヒストリカルデータをもとに、6.4.2 項で示した GBM および Vasicek モデルを用いてユーロダラー（6 ヶ月）金利およびホスト国通貨建ての変動金利について調べる．データは 1985 年 1 月から 1994 年 12 月までをヒストリカルとして扱っている．LIBOR（ユーロダラー）金利については Bloomberg 社データベースより、ホスト国（タイ）通貨建て金利についてはタイ国中央銀行のデータに基づいている．

### GBM による変動金利推定

ケースプロジェクトのローン契約を締結しなければならない 1995 年以降の金利推定評価について述べる．契約に先行する 10 年間の月次データを用いた GBM による推定結果を LIBOR およびタイ市場金利についてグラフ化したものが図 6.2.1 および図 6.2.2 である．いずれの推定も試行パスを 20 回分が表示されており、さらに 1995 年以降にたどった実績金利を示した．LIBOR、タイバーツともに実績として 2004 年まで低金利傾向が続いており LIBOR、タイバーツともに 20 パスで推定した金利最低パスをさらに下回るような経過をたどっている．しかしながら、GBM の推定では年次の進展に応じ推定幅の十分な広がりを見せており概ね実績と重ねて違和感のない予測を行っている．

ただし 4.3.3 項において説明したタイ経済の 97 年危機による為替の急激な変化に見られるように、為替や他の経済パラメータと密接に関係がある市場金利についても、その相互の影響や政策影響などについては、ここでは一切考慮していない．それは経済政

策担当者や金融機関関係者においても将来の経済パラメータを予見的に扱うことはできず、金利リスクの計量はやはり、GBMのようなモデルによらねばならない現実に対応するからである。実務的観点から、為替については電力のオフテーカーである発電公社にリスク移転されており、金利については、その時点で金融機関からオファーできる金利によって事業者もしくは金有機関がリスクの負担者となる。変動金利採用の場合は事業者リスク、固定金利については金融機関リスクとなる。

ここで金利の期待平均と分散は式 (6.13) および式(6.14)から表 6.2.1 を得る。

$$E(S(t)) = \exp(s_0 + \mu t) \quad (6.13)$$

$$\text{Var}(S(t)) = \exp(2(s_0 + \mu t)) \{ \exp(\sigma^2 t) - 1 \} \quad (6.14)$$

表 6.2.1 GBM 推定金利の期待平均および分散

年	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(LIBOR)	S <sub>0</sub> =1.94591(94 年 12 月金利の対数), $\mu = -0.0005$ , $\sigma = 0.059539$									
$E(S_t)$	7.01	7.01	7.00	6.99	6.99	6.98	6.97	6.97	6.96	6.95
$\text{Var}(S_t)$	1.05	3.17	5.34	7.55	9.80	12.10	14.44	16.84	19.29	21.80
$SD(S_t)$	1.02	1.78	2.31	2.75	3.13	3.48	3.80	4.10	4.39	4.69
(Thai Baht)	S <sub>0</sub> =2.384653(94 年 12 月金利の対数), $\mu = -0.00057$ , $\sigma = 0.030537$									
$E(S_t)$	10.88	10.88	10.86	10.84	10.83	10.82	10.81	10.79	10.78	10.77
$\text{Var}(S_t)$	0.657	1.95	3.23	4.49	5.72	6.94	8.13	9.31	10.47	11.61
$SD(S_t)$	0.810	1.40	1.80	2.12	2.39	2.63	2.85	3.05	3.24	3.41
年	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
(LIBOR)										
$E(S_t)$	6.94	6.94	6.93	6.92	6.92	6.91	6.90	6.90	6.89	6.88
$\text{Var}(S_t)$	24.35	26.96	29.64	32.37	35.17	38.04	40.97	43.97	47.05	50.20
$SD(S_t)$	4.93	5.19	5.44	5.69	5.93	6.17	6.40	6.63	6.86	7.09
(Thai Baht)										
$E(S_t)$	10.76	10.74	10.73	10.72	10.71	10.70	10.68	10.67	10.66	10.65
$\text{Var}(S_t)$	12.73	13.83	14.91	15.98	17.02	18.05	19.07	20.06	21.04	22.01
$SD(S_t)$	3.57	3.72	3.86	4.00	4.13	4.25	4.37	4.48	4.59	4.69

#### Vasicek モデルによる変動金利推定

GBM による場合と同様に式 (6.5) ～式 (6.12) に示した Vasicek モデルによる推定結果を図 6.2.3 および図 6.2.4 に示す。

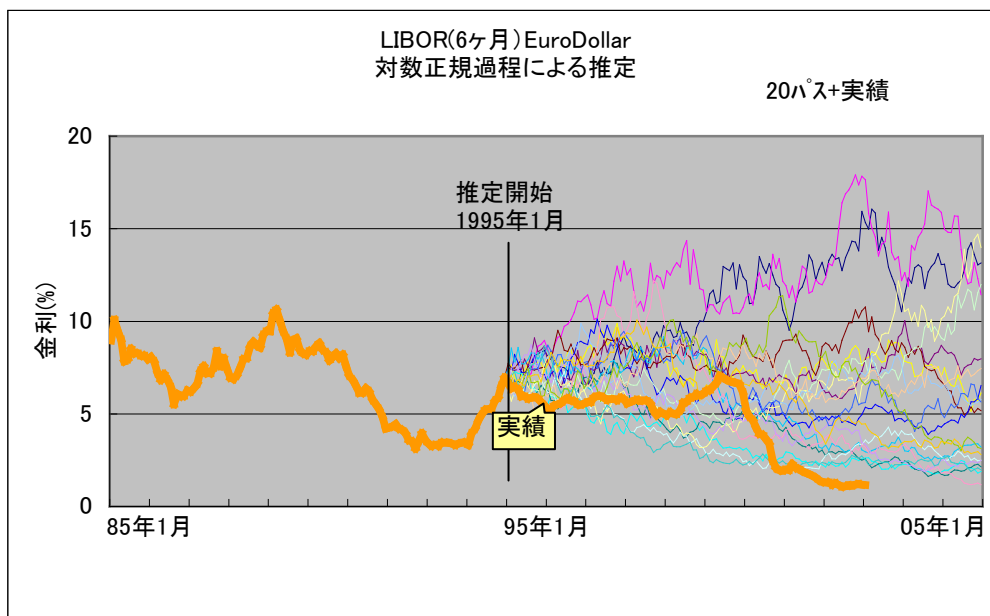


図 6.2.1 GBM による LIBOR 金利

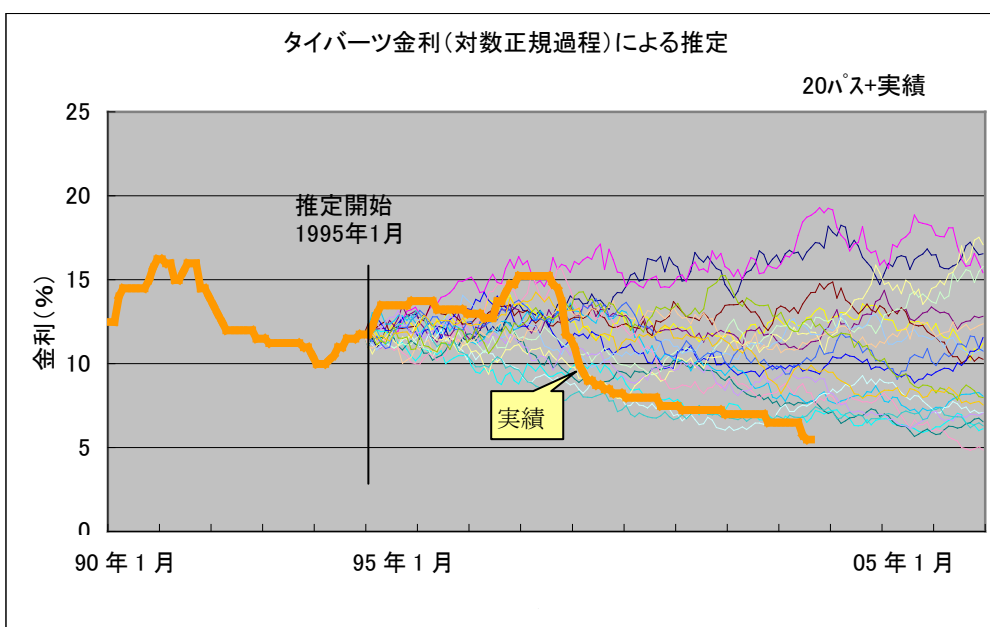


図 6.2.2 GBM によるタイバーツ金利

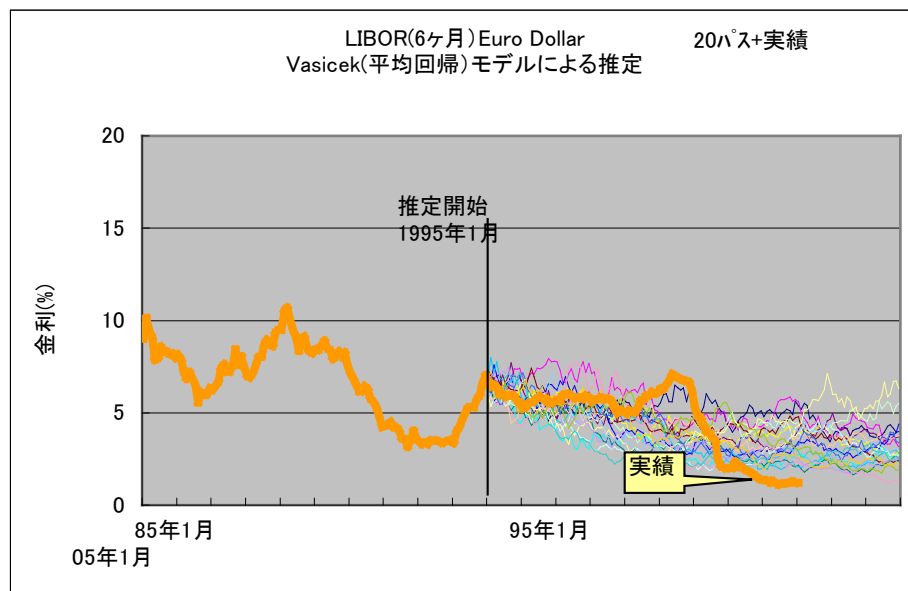


図 6.2.3 Vasicek モデルによる LIBOR 金利

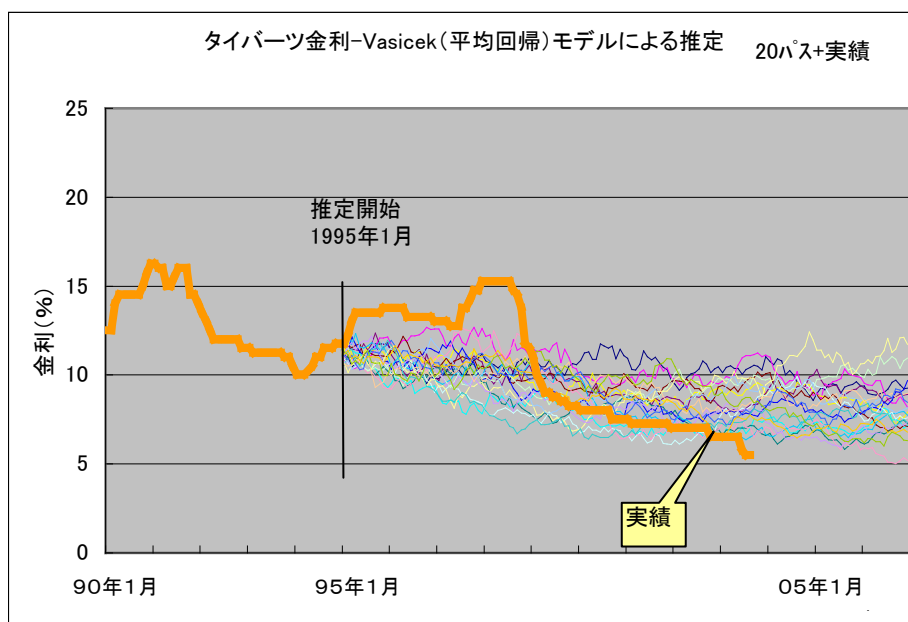


図 6.2.4 Vasicek モデルによるタイバーツ金利



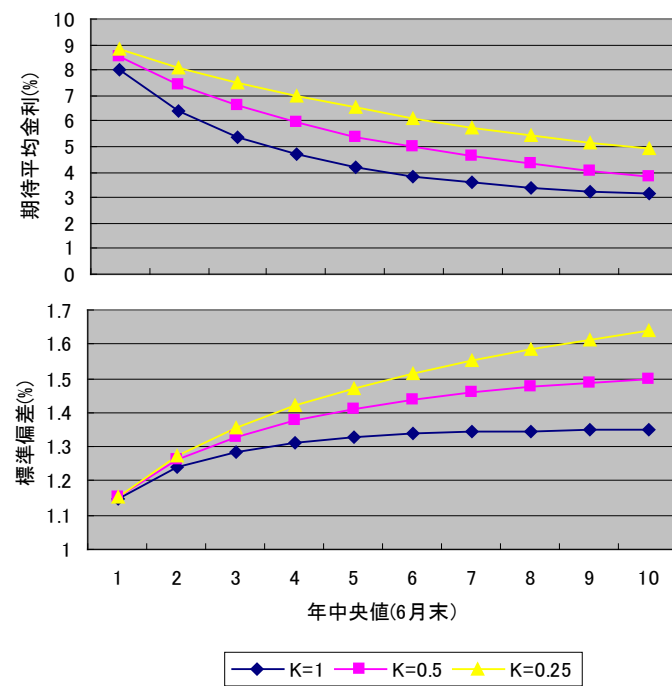


図 6.2.5 LIBOR 金利の平均回帰速度別収束状況

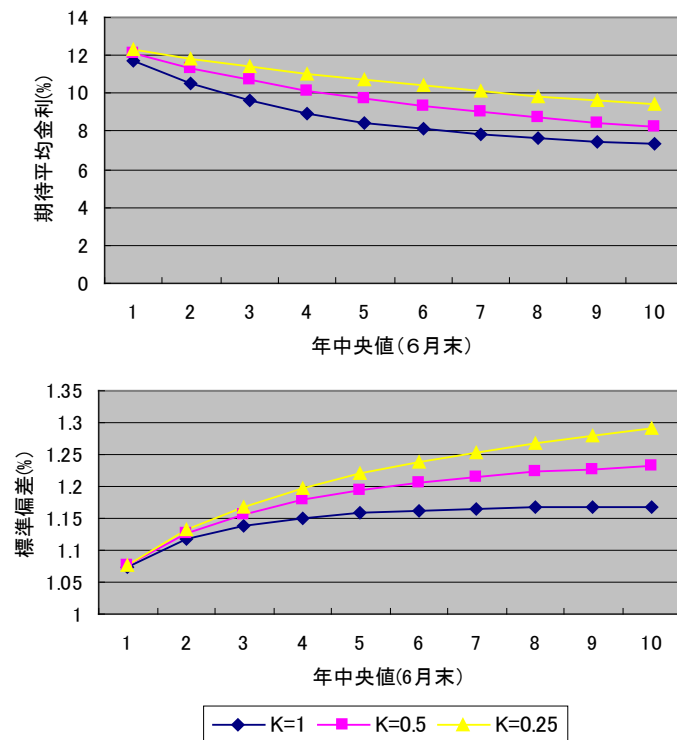


図 6.2.6 タイバーツ金利の平均回帰速度別収束状況

推定に客観性を持たせるためには、推定開始以前のヒストリカルデータによって与えられる回帰直線の延長が与える期待平均値に収束させることが考えられるが、この方法によれば長期トレンドは一方方向的になるため実態を表わさない。従って、回帰すべき期待平均値はマクロ経済学的な観点から推定を行ったり、期待平均値とドリフト成分との量的バランスを見たりするための有用性に限って考えるべきである。またドリフト成分もヒストリカルデータのボラティリティが基準となっておりデータ区間の長短の影響を受ける。一方、平均回帰の速度の影響については、図 6.2.5 および図 6.2.6 に示すように、10 年間のローンを想定してその期限内にほぼ十分収束するのは図 6.2.3 および図 6.2.4 で採用している基準速度  $\kappa=0.02$  (図中における  $K=1$ ) のケースであり、この速度を 50% ( $K=0.5$ ) および 25% ( $K=0.25$ ) に低減したケースでは金利の期待平均値、標準偏差の拡大も収束傾向を見せない。

### (3) 金利変動のモデル入力

本章の目的として、事業者、銀行がプロジェクトにファイナンスする場合のリスク分担の内容を明らかにする観点で、リスクのひとつである変動金利について考察するものである。このために、前項までに見てきたマルコフ過程型の変動金利モデルにおいて Vasicek モデルのようにあらかじめ期待平均値を設定するような人為的なモデルではなく、金利が負になる危険性を持つ GBM モデルであっても同モデルは今回のヒストリカルデータを使用する限りにおいて負の金利を与えることなく実績を包含するパス群を示したことから、表 6.2.1 で示す GBM による推定金利をケースプロジェクトのキャッシュフローモデルに入力し、事業性および融資の実行可能性を調べる各種 IRR および DSCR の値およびボラティリティを算出することとする。

ただし、地下条件によるボラティリティは空間を場としており、支払い月（年）から投融资決定時点の時刻にそのコスト（分布）の現在価値への割引き計算は一義的な結果をもたらすが、多年にわたるマルコフ過程型の金利変動については、予測月（年）単独の時間的断面で確率分布になっている金利分布の場合は地下条件によるボラティリティと同様に扱えるが、ある予測月の金利は前月の値が影響しており、従って当該月の予測確率分布は前月の予測確率分布の影響を受ける。ここでは、マルコフ過程型金利推定モデルによる計算で用いる乱数発生による試行が十分な回数行われれば、将来時刻断面における金利の確率分布は直前の分布に影響を受けない分布に収束すると仮定する[2]。

モデル計算においては事前に返済期間の各年中央月で予測される予測金利の確率分布を計算しておき、キャッシュフロー計算において、それぞれの金利データへの投入を

表 6.2.1 で得ている確率パラメータ（正規分布，期待平均および標準偏差）で行った．

## 6.3 各種リスクの事業性への影響評価

### 6.3.1 ダイナミックキャッシュフロー分析におけるケース設定

前節までに準備した各種のリスクについて，分析ケースを表 6.3.1 のように設定する．個々のリスクファクターの影響度を把握するために，必要以外には既に定義されているモデル上の他のパラメータは変更しない．またローン返済は元利金等払いを採用している．なお，これまでに入力内容の説明がなされなかった以下のリスクファクターについて前提条件を述べる．

- 完工遅延リスク： 他のリスクファクターとの混合分析の便利を考え，モデル内で工期を 1 年延長して 6 年とするのではなく，金銭的影響として，建設中利子の増嵩をキャッシュアウトに織り込むこととする．
- サービス価格レベル： 単純にサービス価格単価 6,500USD に $\pm 650$  USD のケースを入力する．高価格側のケース名を A-2U，低価格側のケースを A-2D とする．
- 為替レート： 基本ケースではすべて 1USD=25Bahts となっているが A-3 ケースで 45 Bahts のケースを検討する．なお為替レート変動の影響は，建設費や OM 費のうち内貨ポーションをドル換算することによって全体の事業性への影響として現れる．
- 消費者物価指数： 基本ケースでは物価上昇は考慮されていない．ここでは建設費および OM 費において，US CPI および Thai CPI が表 6.3.1 に示した値で同時に，それぞれ外貨ポーション，内貨ポーションに作用する前提を入力する．

表 6.3.1 ケースプロジェクトのリスク影響分析内容

分析ケース	ケース名	入力の内容	基本ケース
(A. パラメトリック分析)			
完工遅延リスク	A-1	1 年間の工事中断	第 5 章使用モデル最尤ケース
サービス価格レベル	A-2	6,500 USD/mo/kW $\pm$ 10%	同上
為替レート	A-3	1 USD = 25 および 45 Bahts	同上
消費者物価指数	A-4	US CPI=1.4% Thai CPI=2.0%	同上
(B. 確率分析)			
ローン変動金利	B-1	GBM 推定金利モデル	同上
(C. 確率分析)			
対象 6 リスクすべて	C-1	地盤リスクと上記リスク	—

### 6.3.2 計算結果と考察

#### (1) パラメトリック分析

ケース A-1, A-2, A-3, A-4 についてキャッシュフロー分析を行った結果を表 6.3.2 にまとめて示す。

表 6.3.2 ケースプロジェクトのパラメトリック分析結果

分析ケース	ケース	入力の内容	Equity IRR	Min. DSCR
完工遅延リスク	A-1	建設中平均的に工事遅延. 結果的に 6 年間となった工期に相応する IDC の増高, 初年度収入なく返済 1 年延長, 事業期間 1 年増	13.71 %	1.16
サービス価格レベル	A-2U	6,500 USD/mo/kW ± 10%	18.19 %	1.33
	A-2D		13.37 %	1.14
為替レート	A-3	1 USD = 25 および 45 Bahts	19.62 %	1.51
消費者物価指数	A-4	US CPI=1.4% Thai CPI=2.0%	14.80 %	1.16
基本ケースの値	—	—	15.79 %	1.23

この結果をもとに、相互比較するためのトルネードチャートを Equity IRR に対して図 6.3.1 に、DSCR に対して図 6.3.2 に示す。これらの図で明らかなように、設定した感度分析によれば Equity IRR においても DSCR においても、為替変動による影響が最も卓越しており、実際にタイが 1997 年に経験した為替危機がプロジェクトの事業性に最も影響を与えていることが分かる。内貨の価値下落により自国調達資材・賃金が過小評価されるために事業性はアップサイドに振れている。この影響は第 3 章で定義したボラティリティ  $V_{90}$  で得た地盤リスクによる事業性変動を上回っている。ただし、為替の急激な切り下げが行われる経済環境は多くの場合輸入資材の高騰などインフレと関係が深く、為替を単独のリスクファクターとしてとらえ、さらにはアップサイド影響と判断することには問題がある。

次に完工遅延 1 年の影響およびサービス価格（契約電力料金）の 10% の変動による事業性へのダウンサイドの影響は地盤リスクのダウンサイドリスクの影響レベルを上回っていることが分かる。全体としてケースプロジェクトの例では Equity IRR の変動による出資者の事業意欲への影響よりは、DSCR が感度分析によって 1.20 以下に低下する例が散見され、為替レートを除く各リスクファクターはプロジェクトファイナンスによるローン供与により重大な影響を与えていることが分かる。ただし、当初の事業設計により出資者と銀行側との間にはプロジェクトリターンの回収において配当と金利においてトレードオフの関係があるため、ケースプロジェクト以外で常に銀行ローン側でより影響が大きいとは一般化することはできない。

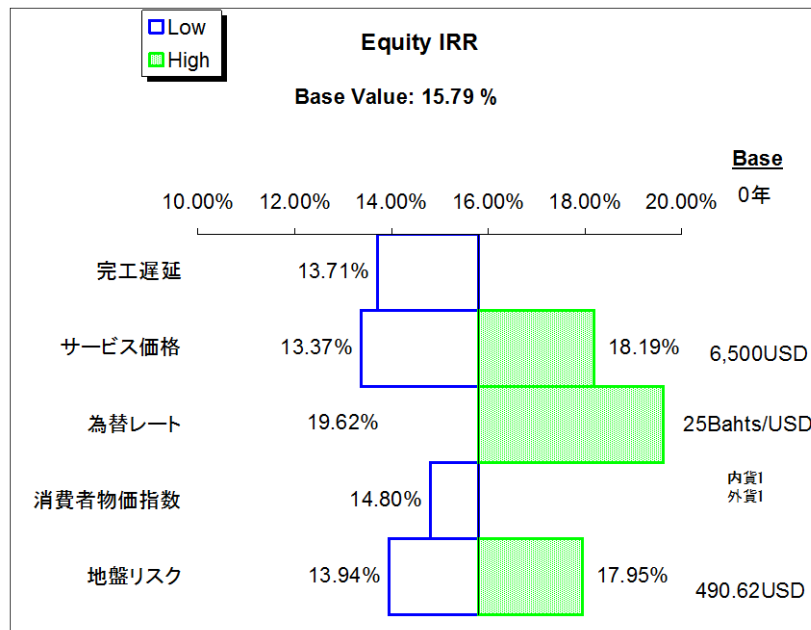


図 6.3.1 個別リスクファクターの Equity IRR への影響

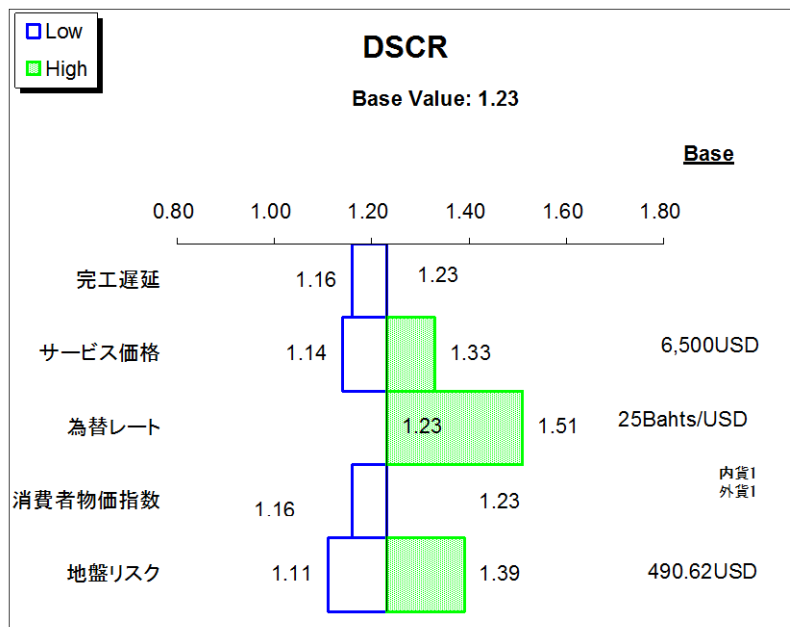


図 6.3.2 個別リスクファクターの DSCR への影響

## (2) ローン変動金利の影響

### (解析結果)

金利推定モデルにより得た金利の期待平均値およびボラティリティ（標準偏差）をケースプロジェクトの返済期間（運転開始 2000 年より 12 年間）中の金利に確率値として適用し、キャッシュフローモデル上でモンテカルロシミュレーションを実施した。基本ケースは第 5 章で使用したキャッシュフローモデルとし、EPC コストは最尤値で変動しない設定とした。金利の影響は一般的には返済の進む後年度ほどその変動の影響は小さくなるが、一方で、金利推定モデル（ウィーナー過程）の特性により標準偏差は年を追うごとに拡大していく。すなわち、返済金利の総額のボラティリティはこの 2 つの相反する変動特性によりシミュレーションにより得ることが効率的である。これらの結果得られた Equity IRR および最小 DSCR の確率分布をそれぞれ図 6.3.3 および図 6.3.4 に示す。また、第 5 章においてシミュレーションを行った地盤条件起因の建設コスト変動による事業性への影響評価結果と比較するために、表 6.3.3 に、両シミュレーション結果の比較を示す。

### (地盤条件変動のケースとの比較)

GBM 推定による金利の変動において最尤値として得られる Equity IRR は、地盤条件変動シミュレーションで得た値 15.79% に比べ、今回 15.64% と大きな違いを見なかった。基線変動が大きい場合は理論上において差は存在しないはずである。モンテカルロシミュレーションにおける乱数の当たり方により僅差が発生したものと考えられる。しかしボラティリティに目を向けると、金利変動のボラティリティは 1995 年までのヒストリカルがベースとなったボラティリティを時間とともに増大させているため、建設期間を過ぎ返済期間において、すなわち推定開始から十分に長い時間が経過した時点において変動金利を入力しているため、この増大したボラティリティの影響を大きく受けるため、結果として地盤条件における Equity IRR の標準偏差が 0.83% であったのに比べ、金利変動による標準偏差は 1.46% とボラティリティは 2 倍弱となっており、ケースプロジェクトにおいて、またそれぞれのリスクファクターに関し仮定した条件において、地盤条件の推定誤差が与える事業性への影響は相対的に小さい結果を得ている。ただし、現実にはこれだけの金利変動が予測される場合は、SPC の資金調達方針としてローンに関しては金利の固定化の手段がとられるであろうし、そのような金融商品が存在する。

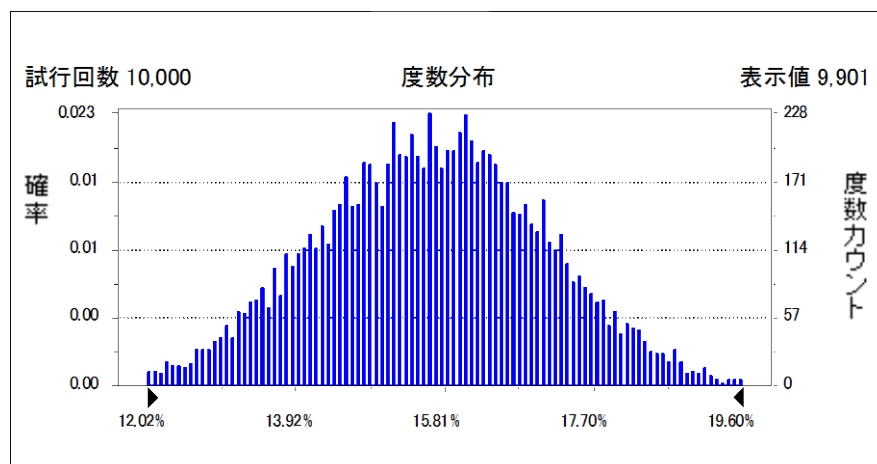


図 6.3.3 GBM 予測変動金利の Equity IRR への影響

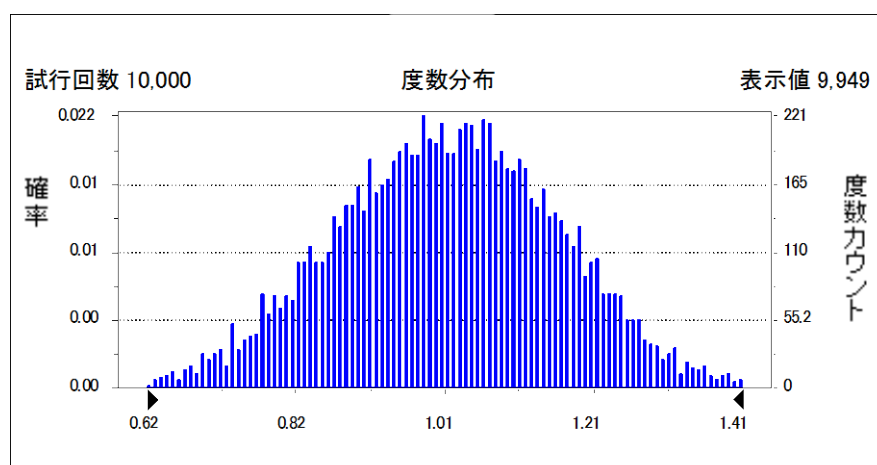


図 6.3.4 GBM 予測変動金利の DSCR への影響

表 6.3.3 地盤条件による建設費変動と GBM 金利変動の事業性評価比較

	最尤値	標準偏差	最大範囲	最小範囲
地盤条件変動				
Equity IRR (%)	15.79	0.83	17.95	13.94
Min. DSCR	1.23	0.06	1.39	1.10
金利変動リスク				
Equity IRR (%)	15.64	1.46	21.09	9.79
Min. DSCR	1.02	0.15	1.52	0.56

#### (現実の資金計画)

最小 DSCR の値は、変動する金利が時系列においてたどるパスにおいて、大きく金利上昇したところで返済余裕率の低下がおきるため、DSCR の最小値も大きく低下していると考えられる。今回のシミュレーションでは最尤で 1.02、シミュレーションで定義した最小範囲において 0.56 と、銀行にとっての債権のリスクとして看過できない領域であるため、このような観点からも長期に及ぶ貸付期間中のリスクミティゲーションとして固定金利の選択を SPC に促す行動がとられると推測される。

#### (返済方式の影響)

また、ケースプロジェクトのフィナンシャルモデルにおいては、収入が安定的な時間経過をたどることもあり、資金計画を平滑化する目的でローン返済として元利均等払いを採用しているため、金利相当返済額がテイルヘビーになっていることから、後半になる程ボラティリティが大きくなる金利変動は、元本均等返済方式のキャッシュフローモデルにおけるよりも、事業性のボラティリティへの影響は大きく出ていると考えるべきである。しかしながら、ケースプロジェクトのようなインフラ事業プロジェクトで、かつ初期資本投資の大きな案件においては元利金等払いによるローン返済の選択機会が多いと考えられるため、元本均等払いのモデルは検討対象外とした。

#### (金利モデルの妥当性)

歴史的に金利のたどる変遷は図 6.2.1 の LIBOR 金利のヒストリカルが示すように、時代に応じて 1985 年の 10% 台から 1994 年には 3% 台まで大きく低下し、その後 1995 年には 7% 近くに短期間に反騰し、そこから再度低下傾向を見せるなど、大きな変化を繰り返している。今回のケースでは 10 年間のヒストリカルを採用したが、このヒストリカルのとり方によって将来推定は大きく変化することになる。しかしながら、過去、予測を超えて経済環境が激変することは実際に発生し、今後の経済環境については市場金利においても大きな変化を否定し得ない以上、ここでは金利推定モデルのモデルフィットの影響を論じる意味は相対的に小さいと言える。



## 6.4 事業評価におけるボラティリティとリスク分担

### 6.4.1 市場性リスク回避に関する現状

前節においてパラメトリック分析によってサービス価格、為替レート、物価などの市場性変動による事業性への影響、またモンテカルロシミュレーションにより確率表現された金利変動の影響について調べた。為替レートの急激な変動や推定変動金利のボラティリティが、本研究で注目するプロジェクトファイナンスの成立性を困難にすることがDSCRの結果をみても明らかであるが、現実のBOTの契約スキームにおいては、為替リスクには為替予約、また金利には固定金利と金融実務上の対処が存在し、プロジェクトファイナンスによる開発途上国の民活インフラ事業への融資は実行されている。

このことが実現している背景には、夥しい金融機関の数、多くの市場性商品とそれを取引きする利便性（流動性）が存在し、各金融機関は自由度の高い資産ポートフォリオを実現することができ、適切なプレミアムによって市場リスクに対処することができているためである。またそれぞれの商品においてヒストリカルデータが整備されておりリスク管理において説明性が確保できる特徴が指摘される。またすべて資産価値は金銭価値によって計測されており、経済活動のための指標として共有化されていることが、リスク対処を相対的に容易にしていると言える。

すなわち、市場参加者の活動とそれに伴う対価プレミアムの資産価格への重畳をもって、市場リスクを有する事業において債務保証なきプロジェクトファイナンスを成立させている。

### 6.4.2 建設費リスク回避に関する現状と今後の可能性

ケースプロジェクトにおける地質起因による建設費変動は銀行からみても、それが理解される限りにおいてプロジェクトファイナンスを阻害する内容ではないことが明らかになった。しかしながら、さらにボラティリティの高い土木工事であったり、投資額全体においてリスク部分の比率が高い場合には、事業性に依拠したプロジェクトファイナンスが困難な事例も存在し得る。

前項の市場性リスク回避に比較し、建設リスクが如何に対処されているかについて考察する。市場リスクの計測が金銭価値のパラメータで計測されるのに比べ、建設リスクは地質条件、施工条件など自然もしくは物理的現象（すなわち技術者が取り扱う範疇）の捕捉を最終的に金銭価値に変換する際にモデル化が必要であり、通常、事業決定者はこのモデルへの理解が小さいと考えられる。したがって、技術者がそのコストや効果に

について計量する慣わしであったといえる。しかしながら、個々の自然現象は共通の指標をもって建設市場で共有されることはなく、また個々のプロジェクトで従事する技術者たちが岩盤分類のように公知となっている情報に基づいてリスク計測を行う機会、さまざまなリスクファクターへの対処としては未だ不十分と言わざるを得ない。

以上のような市場性リスクとの対比の観点から、今後、本研究により提示した地質要因による建設コスト変動の評価手法を含め、建設リスクに関連するリスク評価ひいては事業性への影響の計量化、または計量化によりポートフォリオによるリスク管理の問題に移行できるための条件について以下の項目を指摘し考察する。

- 時間依存しない現象： 自然現象・物理現象は一度記述すれば、将来にわたりその客観性や価値の変化は起こらない。この点において市場性リスクよりもリスク管理の観点で有利である。
- リスクデータベースの構築： 岩盤分類および RMR による地盤条件の評価手法が有用であった。今後、岩盤分類に限らず、条件変動がコストに大きく影響する施工法などにおいても建設業界で共通した規範で作成されたリスクデータベースが構築され、公表される必要がある。また非定常性の強い現象は従来土木工事保険の対象となってきたが、保険対象とならない重大なリスクファクターを網羅し説明されないリスクを最小限であることを非専門家にも説明できる状況にする必要がある。
- リスク評価モデルの開発とデファクト化： データベースとともに本研究で述べたインディケータクリギング手法のようなリスク評価モデルのさらなる研究・開発を行い、その手法のデファクト化が進む必要がある。
- リスク評価における中立性： データの取り扱いや評価モデルの運用において、高い客観性を維持するための中立性を確保する必要がある。しかしながら、こうしたオペレーションに解釈の余地がある場合には真正な判断は困難である。たとえば、公的機関による審査、あるいは利害対立するプレーヤー間においてそれぞれのプレーヤーのために複数の技術者が対向的な関係で建設プロジェクトのリスクを関係者内公開で評価し、各プレーヤーはその結果をみて自己のステークホルダーに説明しうるリスクテイクを実行する。これらの手法の妥当性はさらに検討が必要であろう。

- 財務的ディープポケットの存在： ケースプロジェクトで明らかになったように、今回の地盤起因のリスクは出資者や銀行にとって許容できる可能性が指摘された。この場合は SPC 自身の財務耐力でリスク吸収できることを意味しているが、さらに、SPC よりも財務耐力の大きなスポンサー、EPC コントラクターはいずれも、自己の保有資産リスクの全体が把握され、またリスクが計量されていれば適切な SPC への債務保証やコントラクターのリスクテイクによるターンキー建設契約が可能である。コントラクターによる、リスク管理能力・耐力を活かして利益機会を増大させる工夫が望まれる。
- 建設リスクリザーブ： 計量された建設リスクに対応して建設業界全体でリスクバッファを持てば、個々の企業のバランスシートにおけるポートフォリオの限界の問題を解決できる。従来の土木工事が多く公共工事で実施されてきた背景は、暗黙的にあるいは先験的に建設リスクに対処するリスクバッファとしての財政資金が考えられていたからと解釈できる。

#### 6.4.3 オーナー・コントラクター間の建設契約とリスク分担に関する考え方

建設契約が BOQ 方式であるか EPC ターンキー方式であるかによって、コストオーバーランリスクは契約上、前者はオーナーに、後者はコントラクターの分担となる。本章のリスク分担の検討においては基本的に地盤リスクに鑑み BOQ 契約を前提としている。すなわちオーナーがコントラクターに地盤事由の精算を行うことで Equity IRR が変化するからである。

しかしながら、定性的論理の問題として、EPC ターンキーの契約方式とする場合でも Equity IRR は同様に低下すると考えられる。なぜなら、BOQ ではなく EPC ターンキー契約とする場合、コントラクターはあらかじめコストオーバーランリスクを契約額に織り込まなければならないため BOQ の場合よりも高い見積もりをしなければならないからである。

コストのボラティリティをコントラクター側で吸収する場合は、今度はプロジェクトファイナンスによるローンを実行するレンダーは、コントラクターの財務的信用力を問題としなければならず、やはりプロジェクト経済へのリスク要素ととらえられる。

以上のように考察し、本研究の立場として契約方式の違いについて厳密な分析を加えるものではなく、オーナーが確率的な評価に基づいてリスク分担することの妥当性を論じている。

以上のように, 市場性リスク管理のアナロジーから建設リスク対処の可能性が見出される. 本論文はこれら可能性のうちリスク評価モデルの開発に寄与していると言える.

## 6.5 結 語

本章においてケースプロジェクトをめぐる事業のリスクファクターを整理し、それらの事業性への計量的な分析をダイナミックキャッシュフローモデル上でパラメトリック分析および確率分析によって試みた。これによって建設費リスク、とりわけ地盤条件に起因する工事費変動が事業全体にどのように影響するかを考察した。また通常プロジェクトファイナンスの現場で認識され対処される市場性リスクとの対比において、建設費リスクの特性を明らかにし、今後のリスク管理によってプロジェクトファイナンススキームの適用拡大の可能性を論じた。

本章におけるまとめは以下の通りである。

- ① ケースプロジェクトの事業リスクを **BIS** 規制にもとづくリスク管理の規範と対比しつつ、a)取引先や国の義務履行の健全性に関する信用リスク、b)電力マーケットや各種金融指標など市場性リスク、c)建設リスク、d)その他個別リスク、に整理した。このうち金銭的計量が可能な項目として、地盤起因工事費リスク、完工遅延(1年)、サービス価格レベル、為替レート、物価変動、ローン変動金利を抽出した。
- ② 有り得べし完工遅延、サービス価格、為替レート、物価変動を地盤起因工事費リスクと比較した場合、評価された地盤起因工事費リスクの **Equity IRR(15.79%)**は、1年の完工遅延(13.71%)や 10%のサービス（電力供給）引取り価格引下げ(13.37%)、あるいは過去の傾向による将来の物価上昇(14.80%)などよりも、事業性毀損方向の影響が小さいことが明らかになった。ただし為替リスクは現実には発生したタイにおける 1997 年の為替危機を評価したが、他の経済指標への重共線性の問題から適切ではなく、計量的問題とすることは妥当でないとした。
- ③ プロジェクトファイナンスにおいて銀行が事業性の評価指標として注目する最小 **DSCR** に着目すると、サービス価格の 10%引き下げが同数値を 1.14 とし債務返済の裕度を最も引き下げることが分かった。ただし、ローン供与の決定は最悪シナリオで **DSCR** が 1 以上であれば資金返済が滞らないことを意味するため、必ずしもファイナンスの成立を不可能にするものではない。

- ④ 変動金利についてブラック・ショールズの方法のうち、GBM(Geometric Brown Motion)モデルおよび Vasicek 法による平均回帰モデルを用いて推定を行った結果、平均回帰モデルはヒストリカルデータの低下傾向により、将来推定においてトレンド項の低下を食い止められず必ずしもケースプロジェクトを背景にした金利評価に適さないことが分かった。また、GBM 推定においてはローン決定（1995 年）からボラティリティが増大し、返済開始時（2000 年）で標準偏差 3.48%、返済完了時(2012 年)で同 6.40%におよぶ結果が得られた。
- ⑤ GBM 推定金利をケースプロジェクトの事業性ボラティリティ評価に適用した場合、Equity IRR および最小 DSCR への影響は地盤起因の工事費変動リスクよりも大きく、地盤起因リスクによる Equity IRR の標準偏差 0.83%および最小 DSCR 値 1.10 に対して、金利変動の影響はそれぞれ同 1.46%および 0.56 となりファイナンス供与を難しい事業リスク評価となった。
- ⑥ しかしながら、変動金利などは市場において固定金利商品が存在し、現実的なリスク回避策がある。一方、地盤リスクは今回ケースで相対的に許容範囲と評価されたとしても、地下工事比率や現場条件の異なる事業等においては、事業キャッシュフロー上でのリターンや返済リスクの管理上、今後、建設工事特有のリスク管理手法の整備が望まれ、そのために、a)リスクデータベースの構築、b)リスク評価モデルのさらなる開発とデファクト化、c)中立的なリスク評価、d)財務的ディープポケットもしくは公的な建設リスクリザーブ、の必要性を指摘した。

以上の成果は建設費リスクを、企業と銀行が意思決定に使用する財務分析モデルを確率評価を適用した、ダイナミックキャッシュフローモデルの場で扱うことにより得られた知見である。

## 参考文献

- [1] Merton, R. C. : On the Pricing of Corporate Debt : The Risk Structure of Interest Rates, The Journal of Finance, 29(2), pp.449-470, 1974.
- [2] 田村謙介, 小林潔司 : 不確実性下における道路舗装の修繕ルールに関する研究, 建設マネジメント勉強会サマースクール, pp.21-1, 2001.

## 第7章 結論と課題

### 7.1 結 論

本研究においては、建設プロジェクト、とりわけ地下工事を多く含むプロジェクトを、PFIを前提とした民間事業として、その投融資の妥当性を確率的に評価するための総合的なフレームワークと解析に必要なモデルを提案した。このためのモデル開発・検討の過程で、特に土木工学や地盤工学になじみの薄い非専門分野の事業関係者に対して、地盤リスクをどのように説明していくかが、終始一貫した問題意識となっている。巨額のプロジェクトにおいて資金調達の要は出資者よりもむしろ金融機関であり、その金融機関は経営におけるリスクマネジメントを BIS 規制の規範に則った確率的な管理を行っている。その立場から見て従来明らかでなかった建設工事リスクの確率情報の提供が可能であることを本研究によって明らかにした。

#### 地盤リスクの確率的評価モデル

本研究では、PFIスキームで建設するプロジェクトの総合的な事業リスク評価を行うため、操業段階で想定される長期市場リスクおよび需要変動リスク等と同等に、トンネルおよび地下空洞を構築する地下工事を対象とし、地盤リスクに起因する建設コスト変動特性を総合的に評価する手法を提案した。金融工学の分野で用いられるリスクカーブの概念を用い、地盤条件に起因する建設コストのボラティリティを評価する手法を開発し得た。この過程で得られた知見は以下の通りである。

- 地盤リスク要因に起因する掘削・支保工費による建設コスト変動リスクは、力学的情報を扱うRMRと支保工パターンの離散的な関係を用いて、インディケータークリギングを用いて評価することができる。この手法による場合、コスト変動リスクとモデル化リスクの2種類のリスクを含む。
- コスト変動リスクとモデル化リスク共に、調査量が増加するに連れて全般的に減少するが、調査量の水準が低い場合、調査量の増加に対して必ずしもリスクが減少するとは限らない場合がある。



- 本研究に示す建設費を評価する手法は、操業リスクである長期市場リスクおよび需要変動リスク等と同様の概念、すなわち期待平均値とそのまわりの分散を知ること、に寄与する。これにより地盤要因に起因する建設費変動特性をダイナミックキャッシュフローモデルによって総合的に評価することが可能となる。

### 民活インフラプロジェクトの総合的事業評価手法

民間インフラ事業のリスクに関する分類と考察を行い、地盤リスクを含むリスクの全体像を明らかにするとともに、事業スキームや制度によって回避されるリスクと、市場において計量でき銀行や事業会社において管理可能なものにヒストリカル市場データを検討することにより分類した。

- 事業を開発段階、建設段階、操業段階に分け、それぞれのリスク項目を洗い出し、建設リスク、市場リスクの両方において、計量できるリスクとできないリスクに分け、制御ができないリスクとして、a)今回の地質推定で予見できる範囲を超えた異常な地質の出現や天災不可抗力等による想定外の支出増、b)途上国の信用リスク等計量が難しくかつ民間セクターがコントロールできないリスク、c)為替リスクなど計量できるがボラティリティが大きすぎる場合、などは、依然としてキャッシュフロー上の確率評価の問題ではなく保険や事業契約内容に依存すべきである。
- 計量できるリスクは、地質条件に基づく建設費変動リスク、金利など市場が形成されそこでの支出額変動リスク、などはキャッシュフローにおいて感度分析やモンテカルロシミュレーションを用いたダイナミックキャッシュフロー分析を行い、銀行が必要とする DSCR を確保し、スポンサーが必要とする IRR が達成できるか、ダイナミックキャッシュフローによって Equity IRR と最小 DSCR を確率分布で表し、従来のように単純な完工保証ではなく、銀行が必要とする DSCR が確率的に規定される場合は、必要な信頼度（たとえば 90%信頼度）を満たす保証建設費の約定により、そこから増嵩建設費に対して EPC コントラクターもしくはスポンサーが SPC のために限定的な銀行保証を行うプロジェクトファイナンスのための新しい分担ルールが可能となった。

### ケースプロジェクトにより得られた知見

実在の揚水式水力発電事業に基づきケースプロジェクト（タイ国における揚水発電所、出力 1,000MW）を設定し、地盤リスクによる工事費ボラティリティをキャッシュフローに基づく事業評価の観点から考察した。そのまとめは以下の通りである。

- フィージビリティスタディに基づく工事費を用いたキャッシュフロー分析によれば、地質変化の顕在に伴う支保パターンの不確実性による工事費変動は、総工事費 490.62 MUSD の中に 17.81 MUSD が標準として含まれている。
- 支保工費の変動特性はインディケータクリギングによる確率評価に基づく放水路トンネル、地下発電所空洞を代表とする地盤条件に起因する地下工事の工事費変動の確率関数を期待平均値、最低工事費、ボラティリティ  $V_{90}$  に相当する値を与えることによってあらためて確率分布（3 角形分布）として定義し、民間企業や銀行がプロジェクトの事業性を評価する場合のダイナミックキャッシュフローモデルに入力可能とし、同モデル上でモンテカルロシミュレーションによって地盤リスクがプロジェクトの事業性に及ぼしうる影響を、Equity IRR および DSCR を確率的出力パラメータとして得る手法を開発した。
- 電気料金 6,500 USD/月/kW をはじめとした一定の前提条件のもとで、Equity IRR の期待平均値 15.79%（同標準偏差 0.83）および最小 DSCR 1.23（同標準偏差 0.06）を得て、その変動特性も含めてプロジェクトファイナンスによる資金組成が検討可能な水準であることが判明した。これによって建設費リスク、とりわけ地盤条件に起因する工事費変動を有するプロジェクトに対し、リスクを計量することによるプロジェクトファイナンススキームの適用拡大の可能性を示した。
- 地下工事費のプロジェクトコストに占める絶対額の割合が大きく、地下工事費のボラティリティが融資・投資の判断に大きく影響する場合でも、本研究で示したキャッシュフローモデル上の地下工事費のボラティリティを入力し Equity IRR および DSCR を確率的に評価することによって、民間企業および銀行による出資・融資の限界を知ることができる。このことから、PFI による民間開発と潜在リスク（ボラティリティ）の大きさから、公的開発の合理性を客観評価できる手法でもある。

## 地盤リスクと市場性リスクの比較論

ケースプロジェクトの事業リスクを BIS 規制にもとづくリスク管理の規範と対比しつつ、a)取引先や国の義務履行の健全性に関する信用リスク、b)電力マーケットや各種金融指標など市場性リスク、c)建設リスク、d)その他個別リスク、に整理した。このうち金銭的計量が可能な項目として、地盤起因工事費リスク、完工遅延（1 年）、サービス価格レベル、為替レート、物価変動、ローン変動金利を抽出した。主な知見は以下の通りである。

- 有り得べし完工遅延，サービス価格，為替レート，物価変動を地盤起因工事費リスクと比較した場合，評価された地盤起因工事費リスクの Equity IRR(15.79%)は，1年の完工遅延(13.71%)や 10%のサービス（電力供給）引取り価格引下げ(13.37%)，あるいは過去の傾向による将来の物価上昇(14.80%)などよりも，事業性毀損方向の影響が小さいことが明らかになった．ただし為替リスクについては現実には発生したタイにおける 1997 年の為替危機を評価したが，他の経済指標への重共線性の問題から計量的問題とすることは本ケースにおいては妥当でない．
- プロジェクトファイナンスにおいて銀行が事業性の評価指標として用いる最小 DSCR に着目すると，サービス価格の 10%引き下げが同数値を 1.14 とし債務返済の裕度を最も引き下げることが分かった．ただし，ローン供与の決定は最悪シナリオで DSCR が 1 以上であれば資金返済が滞らないことを意味するため，かならずしもファイナンスの成立を不可能にするものではない．
- 変動金利についてブラック・ショールズの方法のうち，GBM(Geometric Brown Motion)モデルおよび Vasicek 法による平均回帰モデルを用いて推定を行った結果，Vasicek 法（平均回帰モデル）はヒストリカルデータの低下傾向により，将来推定においてトレンド項の低下を食い止められず必ずしもケースプロジェクトを背景にした金利評価に適さないことが分かった．
- GBM 推定金利をケースプロジェクトの事業性ボラティリティ評価に適用した場合，Equity IRR および最小 DSCR への影響は地盤起因の工事費変動リスクよりも大きく，地盤起因リスクによる Equity IRR の標準偏差 0.83%および最小 DSCR 値 1.10 に対して，金利変動の影響はそれぞれ同 1.46%および 0.56 となり評価上はファイナンス供与が難しい事業リスク評価となった．しかし，現実には変動金利などは市場において固定金利商品が存在し，そのような金融商品の活用必要性が示された．

研究で得られた以上の知見から，本研究の成果を以下の事項に要約することができる．

1. 建設リスクをキャッシュフロー上において確率分布で扱ったことにより，企業・銀行における投融資の説明性が向上すること
2. 提案した手法により従来困難と思われてきた地下工事を多量に含むプロジェクトに対して，銀行がノンリコース（リミテッドリコース）によるプロジェクトファイナンスを実行しやすくなること

3. 建設リスクを確率モデルによって評価することにより、プロジェクトオーナー、コントラクターが、自らのリスク対応力や財務的耐力を考慮しつつ、合理的な企業内説明性をもってリスク・リターンを評価し、戦略的な契約内容を立案することができること
4. 民間企業が受容できる事業リスクの内容が整理され、プロジェクトオーナー、コントラクター、銀行など、PFI参加者のいずれもが取りうる限界以上の建設リスクを包含する建設プロジェクトにおいてはじめて、公共部門のコスト変動の吸収力が必要となるが、このような限界について計量的な議論を行いうる基盤を提示したこと

以上の成果は建設費リスクを、企業と銀行が意思決定に使用する財務分析モデルを確率評価の場で適用した、ダイナミックキャッシュフローモデルで扱うことにより得られた成果である。

## 7.2 課 題

欧州大陸においては諸国固有の自然災害についてリスク・スワップの機構があるといわれる、またわが国の損害保険会社が発売した南関東地方における地震保険金ハイリスクハイリターン債権など、自然災害に対するリスクマネジメントへの関心は高い。しかし、地盤リスクに起因するプロジェクトの成立への不確定性に向かう努力には課題が多くあると考えられる。本研究を通じて得られた今後の検討課題を以下に述べる。

- ① 地盤リスクの確率的計量手法を本研究で提示した。しかし、さらにこの評価を安定的なものとし、さらに簡便に評価できるようにするためには今後、a)リスクデータベースの構築、b)リスク評価モデルのさらなる開発とデファクト化、c)中立的なリスク評価プレーヤーの存在、d)財務的ディープポケットもしくは公的な建設リスクリザーブ、の有用性を検討していくことが望ましい。
- ② 求めようとする事業が経済活動目的であるとして、技術者にもその事業性評価には責任があり、その評価は財務の専門家と同一の評価軸で説明される必要がある。そのために、工学的リスク評価とプロジェクト財務分析の融合化をさらに進める必要がある。

2002 年の中東における緊張から原油価格の高騰が 2005 年末現在においても継続しており、アジア各国でも石油の備蓄等の必要性が取りざたされている。そのために地下の改変を伴うプロジェクトの必要性は、開発途上国においても先進国においても、他の地下工事のニーズとともに増大するであろう。このような公共もしくは公益的施設がまた、近年途上国においても採択されることが多い民営化政策に基づき、民間資金を用いて計画されるとすれば、今後、上記課題の研究と成果の普及を急ぐべきである。

# 謝 辞

著者は 2000 年頃アジアの国で BOT 水力への民間投資に取り組んでいました。そこではプロジェクトファイナンスによる事業組成を行おうとする事業者も銀行も、またそうした組織で従事する技術者も含め、多くの人々が大規模土木の建設費が事前には確定的にも確率的にも約束できないものと考えていることに問題意識を持っていました。そのことを当時 AIT (アジア工科大学) に勤務されていた現京都大学の天津宏康教授にバンコクでお話したことからこの研究が始まりました。はじめは論文を書こうというつもりはなく、なんとか建設リスクとファイナンスのつながりの必要性を訴えたいという思いであったのが、だんだん論文にしていく話になりました。天津教授には 5 年余にわたりあらゆる断面で終始、指導、討論、激励をいただき、また著者が困難を抱えているときは優しい友人にもどり遅筆の著者を今日まで導いていただきました。ここに深甚なる謝意を申し上げます。

本研究は京都大学における建設マネジメント勉強会による研究発表、議論、懇親の場で啓発され、すこしずつ進展させることができました。会を主催され大西有三教授、小林潔司教授には、研究室に席を持たない自分にも暖かく勉強の環境を与えて下さり心から御礼申し上げます。論文審査においては、学生時代の恩師家村浩和教授ならびに宮川豊章教授にもお世話になりました。御礼申し上げます。また、勉強会事務局として小林研究室の松島格也助教授、大西正光助手はじめ学生の皆様に、大西研究室においては西山哲助教授、当時大学院生でモデル開発をはじめ共同研究者としてお世話になった高橋徹氏 (JR 東日本)、足立純氏 (三菱商事) に、また研究上のさまざまな手続きや連絡などで大変なご助力をいただいた伊藤榮利子氏に、心から御礼申し上げます。また勉強会常連メンバーとして多々納裕一教授、大本俊彦氏 (大本俊彦建設プロジェクトコンサルタント)、石原克治氏 (日建シビル)、安田亨氏 (パシフィックコンサルタンツ)、和久昭正氏 (名古屋工業大学)、越水一雄氏 (清水建設)、坂東弘氏 (プロジェクト&ソリューション・システム)、高橋健二氏 (水文技術コンサルタント)、江尻良氏 (JR 東海)、中村一樹氏 (応用地質)、小林真五氏 (政策投資銀行)、守屋洋氏 (NTT)、奥野正富氏 (NTT インフラネット)、学生の皆さん、さらに多くの参加者の皆様が有意義な議論をして下さいました。御礼申し上げます。

著者が勤務する J-Power (電源開発株式会社) においては、国際事業部、新事業戦略室および事業企画部において上司であった永吉洋氏、坂梨義彦氏ならびに竹股邦治氏にこの活動にご理解をいただきました。プロジェクトリスク評価を技術的に、また財務的に行う実務において、この活動が思考の整理に有益だったことをご報告し感謝申し上げたいと思います。また、職場の鹿毛雅彦氏には会計学に関し、金村宗氏には確率微分方程式に関し、新井隆氏、本江誠治氏には岩盤調査やラムタコン揚水の地質に関し示唆をいただき、さらに堀正幸氏ならびに前田泰生氏はじめ多くの先輩・同僚の皆様に平素の業務を通じて技術

研鑽の糧や激励を賜りました。ありがとうございます。

最後に、この研究に要していた期間はちょうど、家族の健康上の理由による艱難の時期でもあり、会社のこと、家庭のこと、論文のことに気持ちの仕分けをしながらの執筆でした。そのような張り詰めた環境のなか、妻喜美子の優しく強い理解と協力に励まされ、また2人の息子達とともに乗り越えてきた時間が自分の心の幅を広げてくれたと思います。本当にありがとう。このことを今後の精進の糧にしたいと思います。

(2006年1月)